



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Patrícia Romano Macedo

**Avaliação da Sustentabilidade de Soluções
de Reabilitação para a Envolvente
Exterior de Edifícios de Habitação**

julho de 2012



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Patrícia Romano Macedo

**Avaliação da Sustentabilidade de Soluções
de Reabilitação para a Envolvente
Exterior de Edifícios de Habitação**

Dissertação

Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Ricardo Filipe Mesquita da Silva Mateus

Trabalho efetuado sob a coorientação da
Professora Doutora Sandra Monteiro Silva

julho de 2012

AGRADECIMENTOS

Em apenas uma página seria difícil exprimir a minha gratidão por todos aqueles com quem tive, durante o desenvolvimento desta tese, a oportunidade de aprender, conviver, compartilhar alegrias, percalços e vitórias, e que de algum modo contribuíram para o meu enriquecimento pessoal e académico a diferentes níveis.

Assim, apesar de conter-me a um reduzido número de palavras, espero poder abranger a todos com o meu muito obrigada.

Antes de mais, começo por agradecer a Deus pela Sua inquestionável presença na minha vida, pela força, suporte e sustento que a cada dia renova as minhas forças e as minhas convicções.

À minha família, em especial aos meus pais Otília e Macedo, ao meu irmão Miguel, às minhas tias Lúcia e Manuela, ao meu tio Jorge, à minha avó Maria e ao meu primo Daniel, pelo amor incondicional, confiança, ânimo, exemplo, fonte de inspiração e suporte que foram desde sempre.

Ao Professor Ricardo Mateus, meu orientador, pelo seu exemplo pessoal e profissional, com quem durante este processo tive a feliz oportunidade de conviver. Agradeço-lhe o seu apoio, incentivo e a sua ação determinante para o enriquecimento científico deste trabalho, assim como toda a partilha de conhecimentos.

À Professora Sandra Silva, pelo incentivo, disponibilidade, apoio e análises críticas, ajudando-me na definição deste trabalho.

Ao CITMA - Centro de Ciência e Tecnologia da Madeira pela oportunidade em conceder-me uma bolsa de investigação que tornou este trabalho possível.

Aqueles amigos que me acompanharam, apoiaram e estiveram presentes em todo este tempo e que apesar de não estarem por perto nunca deixaram de manifestar o seu apoio e amizade.

A todos, o meu muito obrigada.

RESUMO

A indústria da construção tem um papel de destaque no Desenvolvimento Sustentável, contribuindo de forma significativa para o impacto ambiental, social e económico da humanidade.

A construção de novos edifícios, infraestruturas e a reabilitação deve reger-se pelos princípios de desenvolvimento sustentável. A reabilitação de edifícios pode contribuir para uma melhoria do desempenho ambiental das cidades e da qualidade de vida dos seus cidadãos.

A construção sustentável considera todo o ciclo de vida de um edifício e todos os recursos utilizados na construção (materiais, solo, energia e água). A reabilitação dos edifícios em detrimento da sua demolição e posterior construção nova constitui assim um importante passo para a construção sustentável.

A presente dissertação pretende contribuir para o desenvolvimento sustentável através da identificação e seleção de soluções construtivas e materiais para a reabilitação da envolvente exterior dos edifícios (paredes exteriores e coberturas) que sejam o mais compatíveis possível com os objetivos do desenvolvimento sustentável. Sendo apresentadas soluções que minimizam o consumo de recursos naturais e de energia não renovável e que, por sua vez, aumentam a qualidade de vida dos utilizadores através do melhor desempenho que essas soluções construtivas apresentam a nível funcional, arquitetónico, saúde, bem-estar, conforto e responsabilidade social.

Foram analisadas diversas soluções construtivas para a reabilitação de paredes exteriores e coberturas, tendo sido avaliado o seu impacto ambiental e contributo para a eficiência energética dos edifícios e para o conforto dos seus ocupantes. Os custos da implementação das soluções e a redução dos consumos energéticos dos edifícios que estas possibilitam, considerando o seu ciclo de vida, foram também estudados.

O melhor cenário de reabilitação para a envolvente exterior de edifícios de habitação foi estudado, tendo em conta os desempenhos ambiental, técnico-funcional e económico.

Espera-se assim que este trabalho contribua de forma positiva para a seleção das soluções construtivas mais sustentáveis para a reabilitação da envolvente dos edifícios por parte dos projetistas que tenham como objetivo proporcionar as condições de conforto adequadas aos ocupantes dos edifícios, minimizando os custos e impactos ambientais associados.

ABSTRACT

The construction industry has an important role in sustainable development, contributing significantly to the environmental impact, social and economic development of the society.

The construction and rehabilitation of buildings and infrastructures must follow the principles of sustainable development. The rehabilitation of buildings can contribute to improving the environmental performance of cities and quality of life of its inhabitants.

Sustainable construction considers the entire life cycle of a building and all resources used in construction (materials, soil, energy and water). The rehabilitation of buildings instead of its demolition and construction of a new one is thus an important step to the sustainable construction.

This thesis aims to contribute to sustainable development through the identification and selection of construction solutions and materials for the rehabilitation of the external envelope of buildings (exterior walls and roofs) that are compatible with the objectives of sustainable development. In this work, the construction solutions that minimize the consumption of natural resources and non-renewable energy and also contribute to increase the quality of life of the occupants of the buildings, due to the better performance that these constructive solutions will have at the functional and architectural level, health, wellbeing, comfort and social responsibility, are presented.

Several building solutions for the rehabilitation of the exterior walls and roofs were analyzed and its environmental impact and contribution to the energy efficiency of buildings and to the comfort of its occupants was evaluated. The costs of implementing these solutions and the reduction in the energy consumption of the buildings that they make possible, considering the life cycle of the building were also studied.

The best rehabilitation scenario for the exterior envelope of residential buildings was also studied, taking into account the environmental, technical, functional and economic performance.

It is expected that this work will contribute to the increase of the designers' knowledge of the construction solutions potential and that this will lead to the selection of more sustainable construction solutions for the rehabilitation of the envelope of buildings aiming to provide the adequate comfort conditions to the occupants of the buildings, minimizing the costs and environmental impacts associated to its life cycle.

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO PARA A ENVOLVENTE EXTERIOR DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO

PALAVRAS-CHAVE

Reabilitação

Desempenho

Otimização

Ambiental

Social

Económico

KEY WORDS

Rehabilitation

Performance

Optimization

Environmental

Social

Economic

ÍNDICE GERAL

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO PARA A ENVOLVENTE EXTERIOR DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO

NOTAS DE APRESENTAÇÃO

v

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organização da dissertação	4

CAPÍTULO 2 – A REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL DE EDIFÍCIOS

2.1. Enquadramento	7
2.2. Evolução do Parque Habitacional Português	11
2.3. O setor da reabilitação em Portugal	13
2.4. Tecnologias de construção do edificado português	15
2.4.1. Estrutura	15
2.4.2. Paredes exteriores	16
2.4.3. Coberturas	17
2.5. Fases do processo de reabilitação sustentável nos edifícios	19
2.5.1. Fase de análise e diagnóstico	20
2.5.2. Fase de projeto	20
2.5.3. Fase de construção	21
2.5.4. Fase de utilização e/ou manutenção	22
2.5.5. Fase de desconstrução	23
2.6. Incentivos existentes à Reabilitação Urbana	23
2.6.1. Programas de incentivo à Reabilitação Urbana	24

CAPÍTULO 3 – SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A REABILITAÇÃO DA ENVOLVENTE EXTERIOR DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO

3.1. Enquadramento	29
3.2. Reabilitação de Paredes Exteriores.....	30
3.2.1. Soluções de Isolamento Térmico Exterior	31
3.2.2. Soluções de Isolamento Térmico pelo Interior	36
3.2.3. Soluções de Isolamento Térmico em Caixa-de-ar	38

3.3. Reabilitação de Coberturas	38
3.3.1. Coberturas Inclinadas	40
3.3.2. Coberturas Horizontais	41

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA ADOTADA

4.1. Objetivos	43
4.2. Descrição do caso de estudo	43
4.3. Metodologia de análise comparativa da sustentabilidade das soluções de reabilitação	44
4.3.1. Quantificação dos parâmetros	45
4.3.1.1. Parâmetros ambientais	47
4.3.1.1.1. CML Baseline 2000	50
4.3.1.1.2. Cumulative Energy Demand	53
4.3.1.2. Parâmetros Funcionais	54
4.3.1.2.1. Simulação energética	55
4.3.1.2.2. Índice de isolamento a sons aéreos ($D_{2m,nT,W}$ e $D_{nT,W}$)	57
4.3.1.3. Parâmetros Económicos	62
4.3.2. Normalização dos parâmetros	63
4.3.3. Agregação dos Parâmetros	63
4.3.4. Determinação da Nota Sustentável	64
4.3.5. Representação do Perfil Sustentável	65
4.2. Otimização das soluções ao caso de estudo	65

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

5.1. Enquadramento	67
5.2. Avaliação Relativa da Sustentabilidade dos cenários de reabilitação de fachadas	67
5.2.1. Quantificação dos Parâmetros	70
5.2.2. Normalização dos Parâmetros	72
5.2.3. Agregação dos Parâmetros	72
5.2.4. Perfis Sustentáveis	73
5.3. Avaliação Relativa da Sustentabilidade dos cenários de reabilitação de coberturas	75
5.3.1. Quantificação dos Parâmetros	77
5.3.2. Normalização dos Parâmetros	78
5.3.3. Agregação dos Parâmetros	79
5.3.4. Perfis Sustentáveis	79
5.4. Otimização do isolamento térmico nas soluções de fachada e cobertura	81
5.4.1. Otimização do isolamento térmico na solução de fachada – execução de uma contrafachada em alvenaria	81

5.4.2. Otimização do isolamento térmico na solução de cobertura – reforço do isolamento térmico nas esteiras horizontais	84
5.4.3. Avaliação dos custos associados à solução otimizada	86
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	
6.1. Discussão dos resultados e conclusões	91
6.2. Perspetivas futuras	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXOS	103
ANEXO I – Base de dados LCA	
AI.1 Fachadas.....	AI.1
AI.2 Coberturas	AI.5
ANEXO II – Índice de isolamento a sons aéreos	
AI.1 Fachadas	AI.1
AI.2 Coberturas	AI.17
ANEXO III – Base de dados dos custos económicos	
AIII.1 Fachadas	AIII.1
AIII.2 Coberturas	AIII.5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sete princípios para a construção sustentável segundo a International Council for Research and Innovation in Building and Construction	8
Figura 2.2: As cinco prioridades para que a construção seja sustentável	10
Figura 2.3: Taxa de crescimento de alojamentos e famílias em Portugal	11
Figura 2.4: Edifícios segundo a época de construção e o estado de conservação	12
Figura 2.5: Percentagem das necessidades de reparações para os edifícios construídos entre 1991 e 2001	13
Figura 2.6: Edifícios Licenciados em Portugal entre os anos de 2003 a 2009	14
Figura 2.7: Reabilitação do Edificado e Construções Novas em Portugal no período de 1995 a 2010	14
Figura 2.8: Proporção da reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação no período compreendido entre os anos de 2001 a 2010	15
Figura 2.9: Tipo de estrutura de construção ao longo dos anos	16
Figura 2.10: Evolução das paredes exteriores em Portugal	17
Figura 2.11: Fases do processo de reabilitação a ter em atenção no ciclo de vida de um edifício	19
Figura 3.1: Exemplo ilustrado da solução de revestimentos independentes descontínuos com interposição de isolante térmico na caixa-de-ar	32
Figura 3.2: Exemplo de uma solução de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento espesso	34
Figura 3.3: Exemplo da solução de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento delgado	34
Figura 3.4: Exemplo da solução de painéis isolantes prefabricados	35
Figura 3.5: Exemplo de uma solução de rebocos isolantes	36
Figura 3.6: Exemplo da execução de uma contrafachada em alvenaria	37
Figura 3.7: Exemplo da execução de uma contrafachada em gesso cartonado	37
Figura 3.8: Exemplo ilustrativo da injeção de isolamento térmico na caixa-de-ar	38
Figura 3.9: Coberturas inclinadas com desvão não-habitável – isolamento térmico na esteira horizontal	40
Figura 3.10: Coberturas inclinada com desvão habitável – isolamento térmico nas vertentes	41
Figura 3.11: Aplicação de impermeabilizações e isolamento térmico em coberturas invertidas	42
Figura 3.12: Aplicação de isolante térmico sobre impermeabilização existente	42
Figura 4.1: Representação do edifício em estudo	44

Figura 4.2: Representação esquemática da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)	45
Figura 4.3: Indicadores de sustentabilidade de edifícios	46
Figura 4.4: Parâmetros a analisar na metodologia MARS-SC	46
Figura 4.5: Fases de implementação do LCA	48
Figura 4.6: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-grave	48
Figura 4.7: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-gate	49
Figura 4.8: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-cradle	49
Figura 5.1: Ganhos obtidos para a otimização das espessuras de isolamento térmico	82
Figura 5.2: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas	83
Figura 5.3: Valores de poupança obtidos para a otimização das espessuras de isolamento térmico	85
Figura 5.4: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas	86
Figura 5.5: Consumo de energia em kWh/m ² .ano para a solução do edifício existente e para o edifício reabilitado	87
Figura 5.6: Valores de poupança que podem ser obtidos com a reabilitação do edifício	87
Figura 5.7: Valores dos custos acumulados do investimento de reabilitação no edifício em comparação com o edifício existente	88

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1: Vantagens e inconvenientes do isolamento térmico exterior de fachadas em relação ao isolamento interior	31
Quadro 3.2: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolamento térmico é pelo exterior	32
Quadro 3.3: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolamento térmico é pelo interior	36
Quadro 3.4: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolamento térmico é na caixa-de-ar	38
Quadro 3.5: Soluções de reforço do isolamento térmico em coberturas	39
Quadro 4.1: Método LCA e unidades utilizados na quantificação de cada uma das categorias de impacte ambiental	54
Quadro 4.2: Pressupostos considerados para realizar a simulação energética no DesignBuilder	57
Quadro 4.3: Frequências críticas e quebra de isolamento por efeito de coincidência de diversos materiais para paredes de 1cm de espessura	60
Quadro 4.4: Peso de cada parâmetro na avaliação do desempenho ambiental	64
Quadro 5.1: Descrição das oito soluções de reabilitação de fachadas	67
Quadro 5.2: Materiais utilizados em cada solução de reabilitação e respetivas quantidades	70
Quadro 5.3: Resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais	71
Quadro 5.4: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros funcionais	71
Quadro 5.5: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros económicos	72
Quadro 5.6: Valores normalizadores dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos	72
Quadro 5.7: Desempenhos ambientais (IA), funcionais (IF) e económicos (IE) para cada um dos cenários de reabilitação	73
Quadro 5.8: Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de fachadas	73
Quadro 5.9: Soluções de reabilitação de fachadas, hierarquizadas por ordem crescente de sustentabilidade	75
Quadro 5.10: Descrição das soluções de reforço de isolamento de coberturas	76
Quadro 5.11: Materiais utilizados em cada solução de reabilitação e respetivas quantidades	77
Quadro 5.12: Resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais	77
Quadro 5.13: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros funcionais	78
Quadro 5.14: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros económicos	78
Quadro 5.15: Valores normalizadores dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos	79

Quadro 5.16: Desempenhos ambientais (IA), funcionais (IF) e económicos (IE) para cada um dos cenários de reabilitação	79
Quadro 5.17: Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de coberturas .	79
Quadro 5.18: Soluções de reabilitação de Coberturas, hierarquizadas por ordem crescente de sustentabilidade	80
Quadro 5.19: Consumos energéticos e custos associados para diferentes espessuras de isolamento térmico	81
Quadro 5.20: Valores dos custos de investimento de reabilitação e de energia para as soluções	82
Quadro 5.21: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas para um período de 10 anos	83
Quadro 5.22: Resultado da simulação das diferentes espessuras de poliestireno expandido extrudido para a otimização da solução de reabilitação de execução de uma contrafachada em alvenaria	84
Quadro 5.23: Valor dos custos de investimento de reabilitação e de energia para a solução existente e para as soluções de diferente espessura de isolamento térmico a aplicar no reforço de isolamento na esteira horizontal	85
Quadro 5.24: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas para um período de 10 anos	85
Quadro 5.25: Resultado da simulação da combinação das soluções otimizadas de isolamento térmico na fachada e cobertura em comparação com a solução existente no edifício	87
Quadro 5.26: Valores dos custos acumulados para o edifício existente e reabilitado .	88

LISTA DE ABREVIATURAS

ADP - Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos

AP - Potencial de acidificação

AQS – Águas quentes sanitárias

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

CED - Cumulative Energy Demand

Ed. - Edifício

EDP - Declarações Ambientais de Produtos

ENR - Energia não renovável incorporada

EP - Potencial de eutrofização

EPA - Environmental Protection Agency

ER - Energia renovável incorporada

ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems

Ext – Exterior

GWP - Potencial de aquecimento global ou efeito de estufa

IHRU - Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana

INE – Instituto Nacional de Estatística

Int - Interior

LCA – Life-Cycle Assessment (Análise do Ciclo de Vida)

LCC - Life Cycle Cost (Custo de Ciclo de Vida)

MARS-SC - Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ODP - Potencial de destruição da camada de ozono estratosférico

POCP - Potencial de formação de ozono troposférico

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECRIA - Regime Especial de Comparticipação na Recuperação de Imóveis Arrendados

RECRIPH - Regime Especial de Comparticipação e Financiamento na Recuperação de Prédios Urbanos em Regime de Propriedade Horizontal

REHABITA - Regime de Apoio à Recuperação Habitacional em Áreas Urbanas Antigas

U - Coeficiente global de transmissão térmica

XPS – Poliestireno expandido extrudido

CAPÍTULO 1 - FUNDAMENTAÇÃO E OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.1. Enquadramento

A temática do desenvolvimento sustentável começou a surgir na segunda metade do século XX, quando o Homem começou a ter consciência da progressiva degradação imposta pelas suas políticas de desenvolvimento ao meio ambiente.

No final da década 60 e início da década de 70, apesar do progresso e desenvolvimento da ciência e da tecnologia, estes ficaram um pouco desvalorizados e passou-se a considerar fundamental para o ser humano a convivência em harmonia com a natureza.

A partir desse período, tomou-se conhecimento que as atividades que o ser humano exerce sobre a Terra sobrecarregarão, com o tempo, a flexibilidade dos sistemas naturais do planeta e de outras espécies, conduzindo à devastação do meio natural e à degradação do próprio meio construído.

Concluiu-se que, como resultado das atividades humanas, a biodiversidade na Terra está a diminuir a uma grande velocidade e que os recursos inorgânicos são esgotáveis, pelo que não é possível continuar a basear os sistemas energéticos em fontes não renováveis, nem manter a atual política relativa ao destino dos resíduos produzidos pelas atividades humanas.

O consumo de recursos naturais tem aumentando exponencialmente, devido a uma população mundial cada vez mais numerosa, que possui um nível tecnológico mais avançado de dia para dia e padrões de conforto cada vez mais exigentes, apesar da quantidade disponível de recursos apresentar um comportamento inverso.

A crise de petróleo da década de 1970 levou a que se reconhecesse que os recursos existentes na Terra não eram inesgotáveis. Nesse período começou a despontar a consciência social acerca da fragilidade do planeta e a palavra ecologia passou a ser recorrente no dia a dia.

O Desenvolvimento Sustentável pretende atenuar o atual rumo do desenvolvimento através da inclusão de questões fundamentais com vista à proteção, manutenção ou melhoria da salubridade e integridade do ambiente, qualidade de vida e bem-estar humano, sem se comprometer as gerações futuras. Este assenta em três dimensões (ambiental, social e económica) e pretende salvaguardar e estimular a coexistência harmoniosa e equilibrada entre as três (Comissão Europeia, 1996).

A indústria da construção constitui um dos maiores setores em toda a Europa, sendo também responsável, a nível mundial, pela maior quota-parte no consumo de matérias-primas. Esta indústria apresenta uma forte interligação com o desenvolvimento sustentável. O aumento da população mundial e as necessidades implícitas em termos de construção de edifícios e de outras infraestruturas, agravarão ainda mais o consumo excessivo de matérias-primas não renováveis, assim como a produção de resíduos.

A aposta na reabilitação de edifícios é um rumo que pode ser adotado como forma de minimizar o consumo de matérias-primas não renováveis, assim como a produção de resíduos.

Reabilitar não é sinónimo de alterar ou danificar a identidade. Reabilitar é renovar, para que a construção possa garantir as funcionalidades e a segurança preambulares e facultar a prossecução dos objetivos alvitados (Cóias, 2007).

A reabilitação possui uma extrema importância, num mundo onde a construção nova ocupou lugar de destaque. O excesso de construção trouxe inúmeros malefícios ao mundo e ao Homem. A natureza deparou-se com uma enorme deterioração, e os seres vivos sentem-na de dia para dia. A própria imagem das cidades alterou-se: os espaços verdes deram lugar à construção desregrada, onde o que importa apenas é erigir construção atrás de construção.

A reabilitação de um edifício deve ser programada com a finalidade de dar resposta positiva e melhorar as exigências associadas ao meio onde se insere e às atividades desenvolvidas no seu interior. Até há algumas décadas atrás, a principal exigência dos edifícios era que este fornecesse ao Homem condições apropriadas para que o mesmo desenvolvesse as suas atividades. No decorrer dos anos, com a evolução do conhecimento do Homem acerca do ambiente exterior e interior do edifício, com o aumento da complexidade das construções, com o aumento das exigências dos ocupantes e do desenvolvimento técnico, foram progressivamente adicionadas outras exigências aos requisitos básicos. O bem-estar e as condições de conforto dos ocupantes são as questões fundamentais para as exigências anteriormente mencionadas (Cóias, 2007).

As crises energéticas e as preocupações ambientais suscitaram uma maior tomada de consciência em relação ao desperdício de energia, à necessidade de redução dos consumos energéticos e às emissões excessivas de dióxido de carbono, o que conduziu à necessidade de se encontrar soluções construtivas que proporcionassem condições de conforto, saúde e bem-estar aos seus ocupantes, com os menores impactes ambientais possíveis e com vista a potencial redução de consumos energéticos.

Muitas das soluções com vista à reabilitação deverão ser equacionadas apenas quando o edifício for objeto de uma intervenção de reabilitação geral, pois só assim se justificam, em termos económicos e funcionais, algumas das soluções. Noutras, a viabilidade técnico-económica é melhorada quando conjugada com uma intervenção de carácter mais estrutural. Outras ainda apresentam vantagens adicionais, por vezes difíceis de serem contabilizadas em termos estritamente económicos.

É de mencionar também que as soluções de reabilitação para os diferentes elementos da envolvente, devem ser analisadas de modo que os benefícios de redução dos consumos de energia, do conforto térmico e da qualidade do ambiente interior sejam enquadráveis o melhor possível com as características de cada edifício e com as condições climáticas no meio onde este se enquadra.

As medidas de eficiência energética a aplicar na envolvente dos edifícios residenciais já existentes podem realizar-se através do reforço da sua proteção térmica, controlo das infiltrações de ar e recurso a tecnologias solares passivas (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

O reforço da proteção térmica pode concretizar-se através do aumento do isolamento térmico dos elementos da envolvente (paredes exteriores, pavimentos sobre espaços exteriores ou não aquecidos, coberturas e vãos envidraçados) e controlando os ganhos solares através dos vãos envidraçados, dotando-os com proteções solares adequadas de forma a otimizar esses ganhos em relação às necessidades de aquecimento e de arrefecimento do edifício, respetivamente no inverno e no verão.

Em termos de hierarquização das medidas de eficiência energética do ponto de vista da análise custo-benefício, as mais favoráveis são, em geral, as que incidem nas coberturas, seguidas das que se referem aos pavimentos sobre espaços exteriores e, finalmente, as respeitantes às paredes exteriores (ADENE & LNEC & INETI & IPQ, 2004).

O trabalho desenvolvido assenta na análise de diferentes cenários de reabilitação para a envolvente exterior de um edifício de habitação, tendo em conta o desempenho ambiental, técnico-funcional e económico de diferentes soluções com vista à reabilitação. Espera-se, que o mesmo contribua futuramente de forma positiva e significativa nas tomadas de decisão dos projetistas e que tenham como objetivo proporcionar conforto aos seus utilizadores, com um mínimo grau de custos e impactes ambientais.

1.2. Objetivos

O objetivo fundamental deste trabalho passa pela seleção de soluções construtivas e processos de construção de modo a que a reabilitação da envolvente vertical seja o mais compatível possível com os objetivos relativos ao desenvolvimento sustentável. Pretende-se apresentar soluções que minimizem o consumo de recursos naturais e de energia não renovável e que, por sua vez, aumentem o grau de satisfação dos utilizadores através do desempenho dessas mesmas soluções construtivas a todos os níveis: funcional, arquitetónico, saudável, responsável, satisfatório.

Resumidamente, os objetivos específicos neste trabalho são:

- Identificar diversos cenários de reabilitação para a envolvente exterior de um edifício de habitação;
- Hierarquizar os cenários de reabilitação de acordo com a sua sustentabilidade;
- Otimizar os cenários de reabilitação mais sustentáveis e analisar os tempos de retorno do investimento para o aumento a espessura de isolamento térmico, a fim de determinar a solução ideal a implementar no edifício em estudo.

1.3. Organização da dissertação

A apresentação e desenvolvimento dos diversos temas encontram-se organizados em seis capítulos, nos quais são abordados os seguintes assuntos.

No **primeiro capítulo** realiza-se a introdução ao tema, enumeram-se os objetivos preconizados e a metodologia adotada para a dissertação.

No **segundo capítulo** é feita uma abordagem à evolução e caracterização do parque habitacional português envolvendo uma análise às características que dizem respeito à época de construção dos edifícios, ao estado de conservação e às necessidades de reabilitação dos mesmos, ao regime de ocupação, aos materiais usados na sua construção, aos processos de construção e anomalias de carácter não estrutural. Neste capítulo são mencionados programas e formas de incentivo à reabilitação e aborda-se ainda de forma integrada as fases do processo de reabilitação sustentável a ter em atenção no ciclo de vida de um edifício.

O **capítulo três** é dedicado à apresentação de cenários de reabilitação para fachadas e coberturas que promovam o conforto térmico traduzido através da implementação/reforço de isolamento na envolvente. O reforço do isolamento térmico das paredes exteriores admite três grandes opções, caracterizadas pelas diferentes localizações possíveis para o isolamento térmico a aplicar: interior, exterior ou na caixa-de-ar. No que respeita às coberturas inclinadas, consideram-se dois procedimentos de reforço de isolamento na esteira horizontal ou nas vertentes. Nas coberturas horizontais existem três grandes opções, dependentes da localização do isolamento: superior, intermédio ou inferior.

O **capítulo quatro** constitui a base da metodologia de investigação para a realização dum caso de estudo. Primeiramente apresenta-se detalhadamente as etapas da metodologia de avaliação da sustentabilidade dos cenários construtivos com vista à reabilitação de fachadas e coberturas. As etapas incluem: quantificação dos parâmetros, normalização dos parâmetros, representação do perfil sustentável, agregação dos parâmetros e determinação da nota sustentável. Neste capítulo enumeram-se também as etapas a seguir na otimização das soluções de reabilitação aplicadas num caso de estudo.

No **capítulo cinco** pretende-se realizar uma análise comparativa entre os vários cenários de reabilitação através da metodologia descrita no capítulo quatro. Através da realização de um caso de estudo pretende-se identificar e otimizar o melhor cenário a aplicar a um edifício. Numa primeira fase hierarquizar-se-ão os cenários construtivos com vista à reabilitação de fachadas e coberturas de acordo com a sua sustentabilidade e, numa segunda fase, otimizar-se-à a espessura do isolamento térmico dos cenários de reabilitação mais sustentáveis, de modo a obter a solução ideal para o edifício em estudo.

Por fim, no **capítulo seis** são apresentadas as perspetivas futuras e conclusões no âmbito da problemática da reabilitação sustentável, nomeadamente no que respeita aos diferentes cenários de reabilitação para a envolvente exterior de um edifício de habitação e os seus desempenhos ambiental, técnico-funcional e económico.

O trabalho é ainda composto por três anexos. No **Anexo I** encontra-se apresentada a base de dados de LCA, onde se apresenta detalhadamente a quantificação das categorias de impacto ambiental de cada um dos materiais constituintes das soluções de reabilitação. O **Anexo II** descreve os cálculos do índice de isolamento a sons de condução aérea das soluções de reabilitação. O **Anexo III** apresenta a base de dados de custos económicos, com as análises económicas das soluções de reabilitação de fachadas.

CAPÍTULO 2 – A REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL DE EDIFÍCIOS

2.1. Enquadramento

A construção de edifícios assume-se como uma necessidade primordial para a sobrevivência da humanidade. Desde a antiguidade que os processos construtivos se encontram em constante evolução, resultado do avanço tecnológico, do desenvolvimento de novos materiais e de novas técnicas de construção, menos dispendiosas e de maior eficiência.

No final da década de 60, início da década de 70, começaram a surgir as primeiras manifestações de preocupação ambiental à escala mundial. À problemática da proteção do ambiente e como consequência da crise petrolífera nos anos 70, associou-se a preocupação com o consumo excessivo de combustíveis, o impacto negativo associado a esse consumo, e as consequências futuras desse consumo excessivo sobre o Planeta Terra.

Tornou-se crescente a consciência de que os recursos naturais, até então utilizados de uma forma completamente desregulada, eram infinitos. A consequência da poluição e consumos exagerados resultantes da indústria da construção torna-se assim evidente, primeiramente ao nível da energia despendida na fase de utilização dos edifícios e mais tarde na quantidade de energia necessária para a produção dos elementos construtivos. Devido ao consumo excessivo de energia e de recursos naturais, sentiu-se a necessidade de encontrar soluções e estratégias de forma a minimizar o impacto negativo que esta atividade proporciona ao planeta e consequente ao Homem.

Com o apoio crescente de diversas nações iniciou-se um processo de gestão racional dos recursos naturais, principalmente no que respeita ao consumo energético e à utilização racional de combustíveis, da qual surge o conceito de Desenvolvimento Sustentável e de Construção Sustentável. Ao longo dos anos este conceito tem sofrido algumas alterações e atualizações.

A primeira definição deste conceito surge em 1987 pela Comissão Mundial do Ambiente e do Desenvolvimento no Relatório de Brundtland, intitulado *Our Common Future*. Nesse relatório o desenvolvimento sustentável foi definido como o desenvolvimento que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras para satisfazerem as suas próprias necessidades (WCED, 1987).

No que respeita ao conceito de Construção Sustentável, este tem sofrido algumas evoluções ao longo do tempo. Atualmente, a definição mais consensual, e aquela que tem sido considerada a base para as demais definições, foi a proferida por em 1994, no CIB (International Council for Research and Innovation in Building and Construction), pelo Professor Charles Kibert. Este conceito foi definido como a criação e o planeamento responsável de um ambiente construído saudável, com base na otimização dos recursos naturais disponíveis e em princípios ecológicos (Kibert, 1994). No âmbito da mesma conferência, de forma a delimitar os principais objetivos e a melhor definir o conceito, o CIB expôs um conjunto de vetores fundamentais, aos quais denominou de sete princípios para a Construção Sustentável (Figura 2.1).

Enquanto a construção tradicional se centra apenas em questões de qualidade, tempo e custo, associados ao produto, a construção sustentável acrescenta a essas temáticas as preocupações ambientais. A construção sustentável inclui assim os seguintes aspetos (Lauria, 2007):

- Aproveitamento dos recursos naturais;
- Gestão e economia de água;
- Eficiência energética;
- Gestão dos resíduos gerados pelos utilizadores;
- Criação de um bom ambiente interior;
- Conforto térmico e acústico.

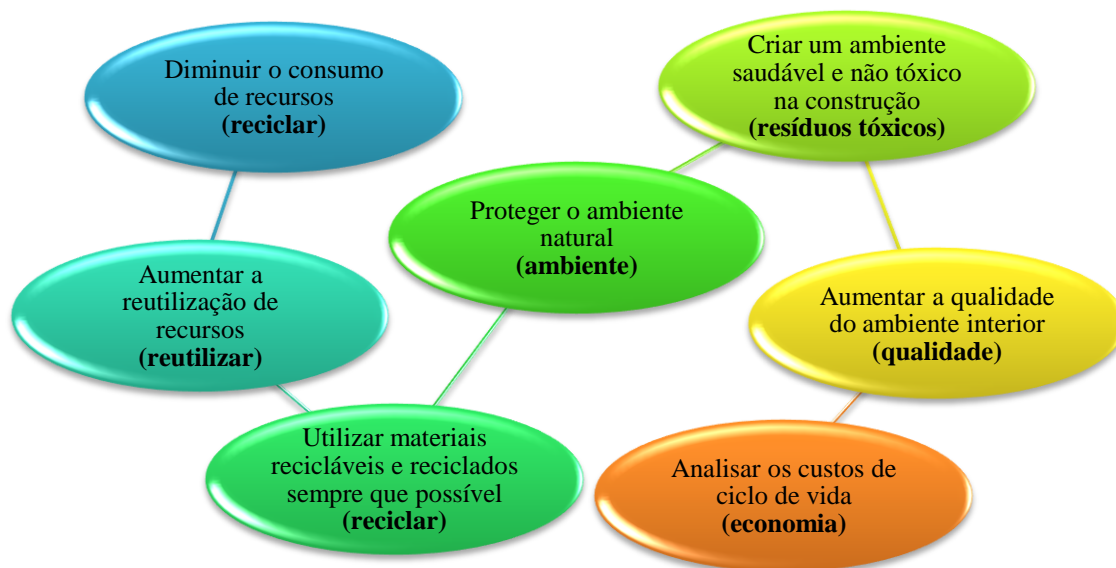


Figura 2.1: Sete princípios para a construção sustentável segundo a International Council for Research and Innovation in Building and Construction (Adaptado de Kibert, 1994)

A construção sustentável é assim um conceito holístico e multidisciplinar. É um conceito holístico porque simplifica em objetivos concretos as interações entre o meio construído e o meio natural, de modo a dar indicações objetivas acerca das ações a desenvolver de modo a que esta indústria seja cada vez mais compatível com os objetivos do desenvolvimento sustentável. A multidisciplinaridade deste conceito está associada ao facto de nos produtos finais desta indústria se integrarem diferentes valências profissionais e devido ao facto de haver diferentes tipos de intervenientes durante a sua utilização, manutenção e final do ciclo de vida. As construções só poderão ser sustentáveis se for possível concertar esforços entre os diferentes tipos de intervenientes no seu ciclo de vida (Mateus, 2009).

A reabilitação dos edifícios existentes em detrimento da sua demolição e posterior construção nova constitui um importante passo no que diz respeito à construção sustentável. Esta é uma atividade fundamental para atingir o desenvolvimento sustentável de um país, pois tem a capacidade e a responsabilidade de melhorar significativamente a sustentabilidade do parque habitacional existente.

Para que a reabilitação tradicional se torne num processo sustentável é necessário que esta se enquadre no conceito de construção sustentável. Torna-se assim fundamental, que ao longo do ciclo de vida de um edifício se considerem as três dimensões do desenvolvimento sustentável: ambiente, economia e sociedade.

A reabilitação perfilha hoje uma importância extrema, num mundo onde a construção nova ocupou lugar de destaque. O excesso de construção trouxe inúmeros malefícios ao mundo e ao Homem. A natureza deparou-se com uma enorme deterioração, os seres vivos sentem-na de dia para dia. A própria imagem das cidades alterou-se: a ausência de espaços verdes, mecanismos vitais que contribuem para o bem-estar do Homem e que proporcionam a renovação do ar da própria cidade, como se tratasse de um pulmão, deu lugar à construção desenfreada, onde o que importa apenas é erigir construção atrás de construção. Deu-se assim, o início ao caos urbano e ao caos mundial.

O conceito de reabilitação de uma construção surge invariavelmente ligado ao conceito de utilidade dessa construção. Segundo os Comitês 116 (*Terminology and Notation*) e 364 (*Rehabilitation*) ambos do *American Concrete Institute*, a reabilitação consiste “na reparação ou modificação de uma estrutura, de modo a obter um determinado tipo de utilidade” (Coias, 2007). Quando se trata de construções com valor histórico, a definição ganha uma dimensão de salvaguarda. Segundo o *Secretary of Interior’s Standards for Rehabilitation*, ou o *California Historical Building Code dos Estados Unidos*, a reabilitação é o “ato ou processo de possibilitar um uso eficiente e compatível de uma propriedade, edifício ou estrutura, através de reparações, alterações e acrescentos, preservando, ao mesmo tempo, as partes ou características que traduzem o seu valor histórico, cultural ou arquitetónico” (Coias, 2007).

A reabilitação de edifícios, nomeadamente da sua envolvente vertical, é uma atitude cultural no sentido de preservação de uma memória, em particular da evolução das cidades e da sua vivência, e uma forma de evitar a degradação do aspeto dos centros urbanos. Adicionalmente, evitam-se a criação de resíduos resultantes da construção e demolição, assim como se atualiza o nível de conforto dos edifícios e o seu aspeto arquitetónico.

Para além do objetivo fundamental de defender, de conservar e de aproveitar os recursos disponibilizados pelo património construído, é necessário que hoje, se consiga dotá-lo de capacidade de resposta perante as exigências de uma vida contemporânea. Essas exigências passam por integrar valores sociais, ambientais e económicos, a fim de conseguir soluções sustentáveis que preservem a plástica urbana.

A reabilitação constitui assim uma das vias mais promissoras para a correção de situações de inadequação funcional, proporcionando a melhoria da qualidade térmica e das condições de conforto dos seus habitantes. Também permite reduzir o consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação, contribuindo para o objetivo estratégico de redução das necessidades energéticas do país, possibilitando adicionalmente em muitas situações, a correção de certas patologias ligadas à presença de humidade e à deterioração do aspeto nos edifícios (ADENE & LNEC & INETI & IPQ, 2004).

Na Figura 2.2 apresentam-se cinco prioridades para que, segundo o projeto *Sustainable Building* da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico - OCDE, uma construção seja sustentável. As mesmas também podem ser adotadas numa reabilitação, tornando este sustentável.

Para garantir uma reabilitação sustentável é necessário que se tomem medidas sustentadas, prevendo e avaliando o desempenho das ideias/soluções para o ciclo de vida, segundo vários critérios (Lauria, 2007):

- Conforto térmico, acústico e visual;
- Salubridade e qualidade do ar interior;
- Custos económicos de manutenção.

Nas sociedades contemporâneas é reconhecida a importância cultural e económica da conservação do património arquitetónico e urbano, assim como, da reabilitação do parque habitacional.

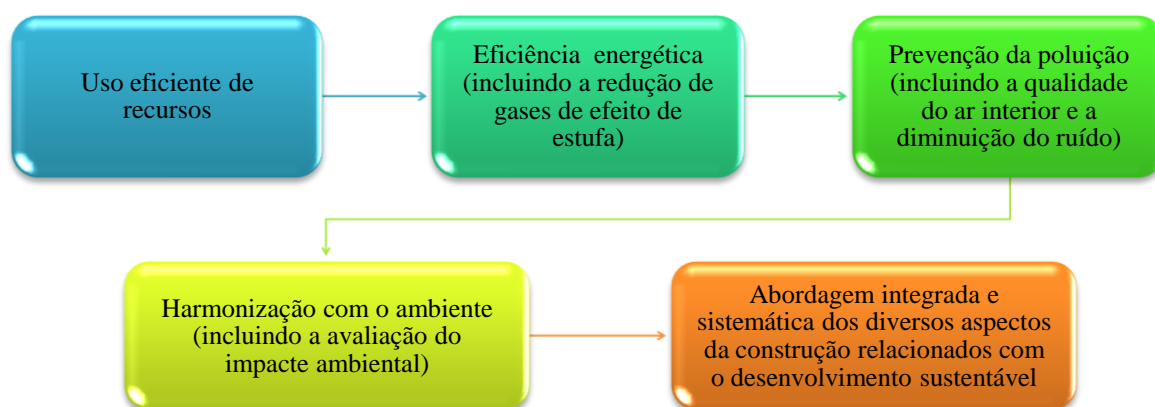


Figura 2.2: As cinco prioridades para que a construção seja sustentável (OCDE, 2002)

Nos últimos 20 anos assiste-se no contexto europeu, de um dos maiores crescimentos do setor da habitação. Atualmente, o mesmo assume-se de grande importância na estrutura produtiva do setor da construção. Tal facto deve-se, porventura, às crescentes exigências dos consumidores europeus em termos de conforto, segurança e utilização de novas tecnologias.

No conjunto dos países europeus, Portugal é o que menos usa e mais sistematicamente deixa degradar o parque habitacional, prevalecendo ainda a atitude de construir de novo ao invés de reconstruir/reabilitar o parque habitacional existente. Esta situação deve-se fundamentalmente à inexistência de políticas concertadas para a promoção e aproveitamento sistemático do parque edificado existente e da salvaguarda do património urbano (Chaves, 2009).

Existem outras justificações para que este setor não se consiga fortalecer no país. Desde logo, a reduzida expansão neste segmento é explicada por vários fatores do passado e alguns do presente, nomeadamente o facto da forte migração e do êxodo rural não permitir a criação de potencialidades para investimentos de recuperação. Também a inexistência de um mercado de arrendamento competitivo e atrativo, sobretudo nas grandes cidades, contribui para o fraco crescimento deste setor, o que, aliado às facilidades de crédito à aquisição de habitação e às taxas de juro favoráveis, que se verificaram no passado, potenciaram a construção de habitação própria, que na nossa sociedade tem um grande valor social.

Atualmente, a atividade de conservação e reabilitação em Portugal tem registado taxas de crescimento significativas, devido a: algumas políticas públicas e a programas de recuperação que incentivaram a realização de intervenções no parque habitacional existente em zonas históricas; à existência de benefícios fiscais e financeiros de apoio à conservação de edifícios; ao aumento dos preços da habitação nova; e ao aumento das taxas de juro.

2.2. Evolução do Parque Habitacional Português

Nas últimas décadas o desenvolvimento das cidades nos países da Europa Ocidental, tem valorizado a reabilitação urbana, com a finalidade de dar resposta às potenciais carências habitacionais da população e promover a proximidade entre atividades e pessoas, contendo ao mesmo tempo a expansão territorial das áreas urbanas.

Em Portugal os últimos anos foram marcados, quer por um incremento da oferta, como por um aumento da procura de habitação. O crescimento do número de fogos construídos deveu-se à facilidade de acesso ao crédito para adquirir casa própria, por via da diminuição das taxas de juro, do aumento do rendimento das famílias, e pela inércia do mercado de arrendamento de habitações, em alguns casos bastante degradadas (INE, 2009).

A dinâmica construtiva reflete a forte expansão do mercado imobiliário em Portugal nas últimas décadas. De acordo com os dados fornecidos pelo Recenseamento da População e da Habitação do Instituto Nacional de Estatística de 1970, 1981, 1991, 2001 e com os Resultados Preliminares dos Censos 2011 é possível constatar fortes dinâmicas no setor da habitação.

O aumento dos alojamentos ao longo das décadas de 70, 80 e 90 foi sempre superior aos 20%, ainda que as taxas de crescimento tenham diminuído de intensidade ao longo do período: 27% na década de setenta, 22% na década de oitenta e 21% na década de noventa (Figura 2.3) (INE, 2001).

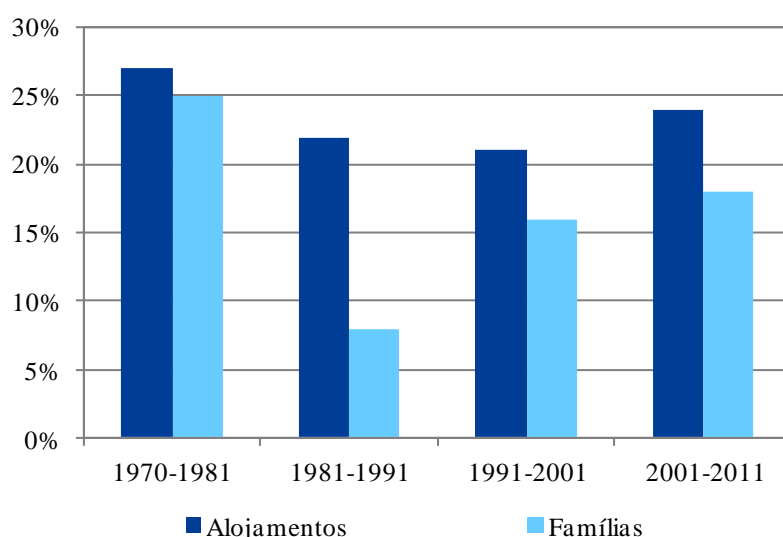


Figura 2.3: Taxa de crescimento de alojamentos e famílias em Portugal (INE, 2011)

Na última década, segundo os resultados preliminares dos Censos 2011, o parque habitacional manteve a trajetória de crescimento também verificada nas décadas anteriores, embora a um ritmo inferior. Atualmente, Portugal dispõe de mais 12% de edifícios habitação e de 16% de alojamentos, relativamente ao ano de 2001 (INE, 2011).

Ao nível dos fogos, estima-se que entre o período de 2001 e 2010 o crescimento médio ronde os 12,6%, correspondendo à construção de mais 644 mil fogos (INE, 2010). Analisando a evolução entre o ano de 2001, quando se realizou o Recenseamento da Habitação, e 2010 é possível verificar que o número total de edifícios cresceu cerca de 8,5%, correspondendo a mais 273 mil edifícios (INE, 2011).

A Figura 2.4 representa a relação entre a época de construção e a necessidade de reparação.

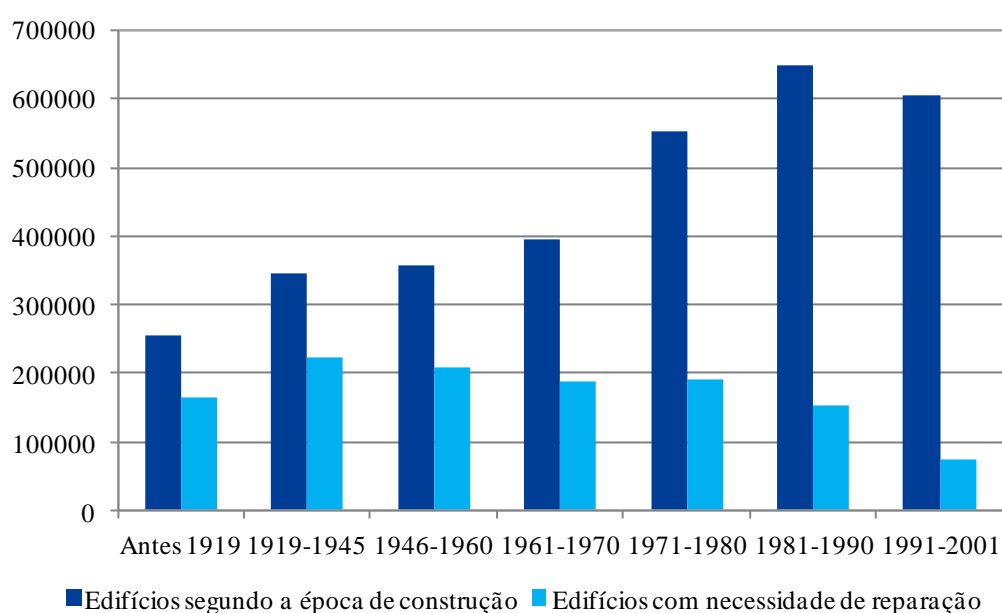


Figura 2.4: Edifícios segundo a época de construção e o estado de conservação (INE, 2001)

Relativamente à idade do parque habitacional, que constitui um dos principais indicadores quanto ao seu estado de degradação, pode-se dizer que a maior parte do parque habitacional português é de construção relativamente recente, sendo que aproximadamente 57,2 % dos alojamentos recenseados se encontram em edifícios com menos de 40 anos, enquanto a percentagem de edifícios construídos antes de 1919 se reduz a 8% (INE, 2010).

Relativamente ao estado de conservação dos alojamentos clássicos, os dados dos Censos 2001 permitem concluir que dentro do número total de edifícios construídos em Portugal no período de 1991 a 2001, cerca 73 843 edifícios apresentavam necessidades de reparação (Figura 2.5). Destes, 75% necessitavam de pequenas reparações, 20% de reparações médias e 5% de grandes reparações

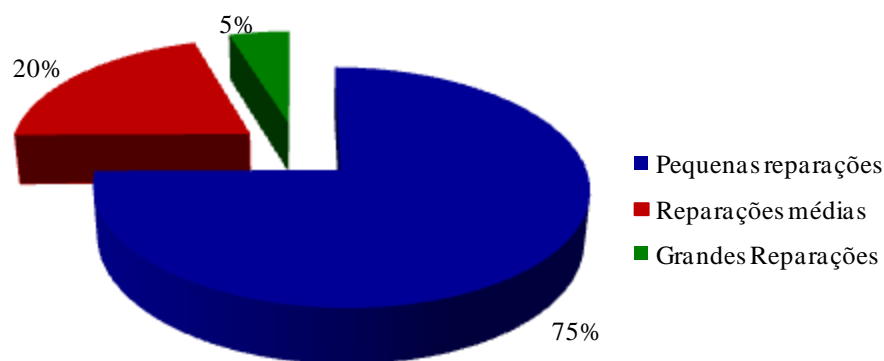


Figura 2.5: Percentagem das necessidades de reparações para os edifícios construídos entre 1991 e 2001
(Adaptado de INE, 2001)

2.3. O setor da reabilitação em Portugal

Nas últimas décadas, o desenvolvimento das cidades nos países da Europa Ocidental tem valorizado a reabilitação urbana, com a finalidade de dar resposta às carências habitacionais da população e a promover a proximidade entre atividades e pessoas, contendo a expansão territorial das áreas urbanas.

Em Portugal, os últimos anos foram marcados quer por um incremento da oferta, dado o crescimento do número de fogos construídos, como por um aumento da procura de habitação, devido à facilidade de acesso ao crédito para adquirir casa própria, por via da diminuição das taxas de juro, do aumento do rendimento das famílias, e pela inércia do mercado de arrendamento de habitações (INE, 2009).

A existência de diversos programas e planos no âmbito da requalificação, e respetivo quadro legal, sugerem a relevância atribuída a este processo para o desenvolvimento sustentado das áreas urbanas (INE, 2009).

Em Portugal, tal como se apresenta na Figura 2.6, o número de novos edifícios licenciados registou um decréscimo de 21,5% no ano de 2009 face ao ano de 2008, acentuando-se assim a tendência de diminuição de construção de novos edifícios que se vem a sentir desde o ano de 2000 (INE, 2010).

Em Portugal, a maioria dos licenciamentos referem-se a novas construções, representando cerca de 67,5% do total de edifícios. Em 2008 as construções novas representavam cerca de 72,3% do total de edifícios, o que evidencia a importância crescente na reabilitação do edificado no setor da construção (INE, 2010). Apesar da grande predominância da construção de novos edifícios, denota-se que a reabilitação na edificação é uma aposta crescente no setor da construção, pois encontra-se a ganhar importância relativamente aos anos anteriores (Figura 2.7).

Em Portugal, entre o período de 1995 a 2010 a evolução de edifícios concluídos, reabilitações do edificado e construções novas, apresenta duas fases de crescimento distintas. O comportamento da Figura 2.7 indica que até 2002, as obras de reabilitação decresceram,

crescendo as de construção nova. A partir de 2002 até 2009 verifica-se um movimento contrário, caracterizado por uma quebra das obras de construção nova acompanhada por um ligeiro aumento das obras de reabilitação. Esse aumento é, ainda assim, pouco significativo, pois as obras de reabilitação atingiram o seu valor máximo em 1995 com 23,7%, tendo chegado em 2009 aos 22,1% (INE, 2010).

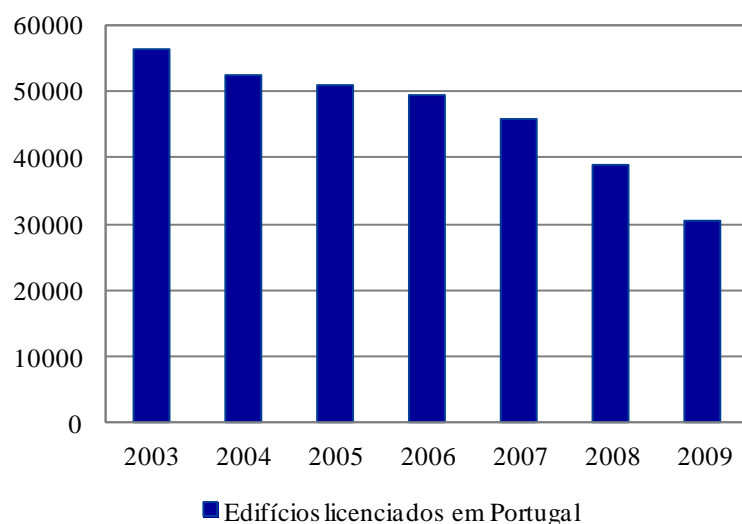


Figura 2.6: Edifícios Licenciados em Portugal entre os anos de 2003 a 2009 (Adaptado de INE, 2010)

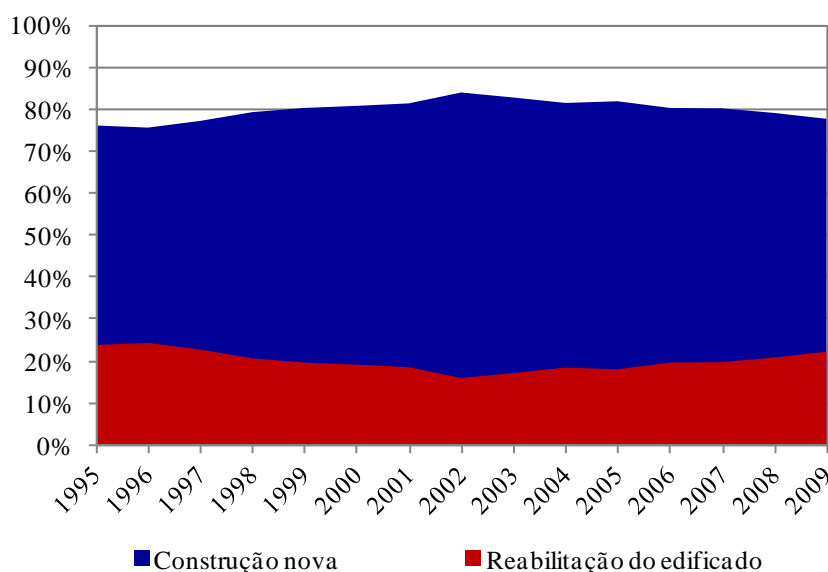


Figura 2.7: Reabilitação do Edificado e Construções Novas em Portugal no período de 1995 a 2010 (INE,2010)

Numa comparação entre o número de edifícios para habitação familiar (Figura 2.8) em que foram realizadas obras de reabilitação, com o número de edifícios resultantes de construção nova, também para habitação familiar, é possível concluir que a nível nacional, a proporção entre ambos apresenta um valor médio de 20,6% no período compreendido entre 2001 e 2009. No entanto, registou-se um aumento progressivo desta proporção nos últimos anos, tendo atingido o seu valor máximo em 2009 de 25,1% (INE, 2010).

Nas Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira, a reabilitação do edificado é relativamente mais expressiva quando comparada com a construção nova, ultrapassando de forma contínua desde 2001 a proporção obtida a nível nacional (INE, 2010).

Em 2009 concluíram-se 40395 edifícios em Portugal, sendo que destes cerca de 8916 correspondiam a obras de alteração, ampliação e reconstrução, o que significa que cerca de 22,1% das obras concluídas respeitam à reabilitação do edificado (INE, 2010).

Face ao ano de 2008, registou-se um acréscimo de 2,2% do número de edifícios reabilitados, sendo que a maior parte destes, cerca de 66,9%, correspondem a obras de ampliação. Relativamente às obras de reconstrução, estas correspondem à mais pequena fatia das obras de reabilitação do edificado, com um peso de 14,5% face ao total (INE, 2010).

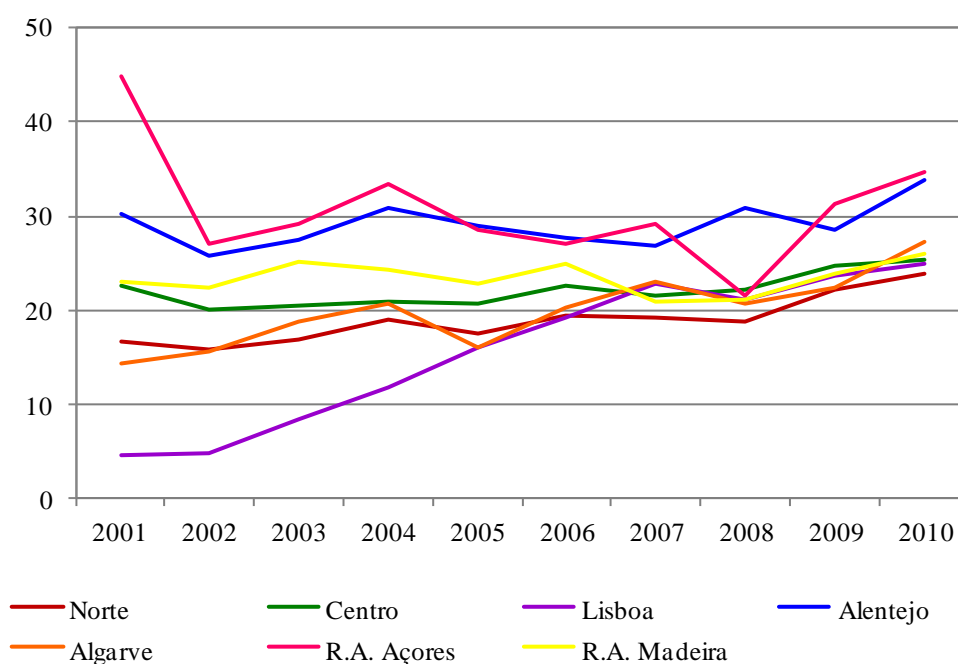


Figura 2.8: Proporção da reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação no período compreendido entre os anos de 2001 a 2010 (Adaptado de INE,2010)

2.4. Tecnologias de construção do edificado português

2.4.1. Estrutura

As características físicas das habitações, especialmente os materiais e os sistemas construtivos utilizados na edificação, são indicadores importantes para perceber o património construído.

A construção com estrutura porticada de betão armado e paramentos de alvenaria de tijolo abrange a esmagadora maioria dos edifícios que se constroem atualmente (Figura 2.9).

Uma segunda característica diz respeito à predominância na construção de materiais com forte inércia térmica. As várias soluções construtivas vigentes mantêm em comum o facto de

usarem paramentos, pisos e divisórias pesadas. Contudo nos últimos anos assiste-se a um maior incremento das soluções de paramentos ligeiros.

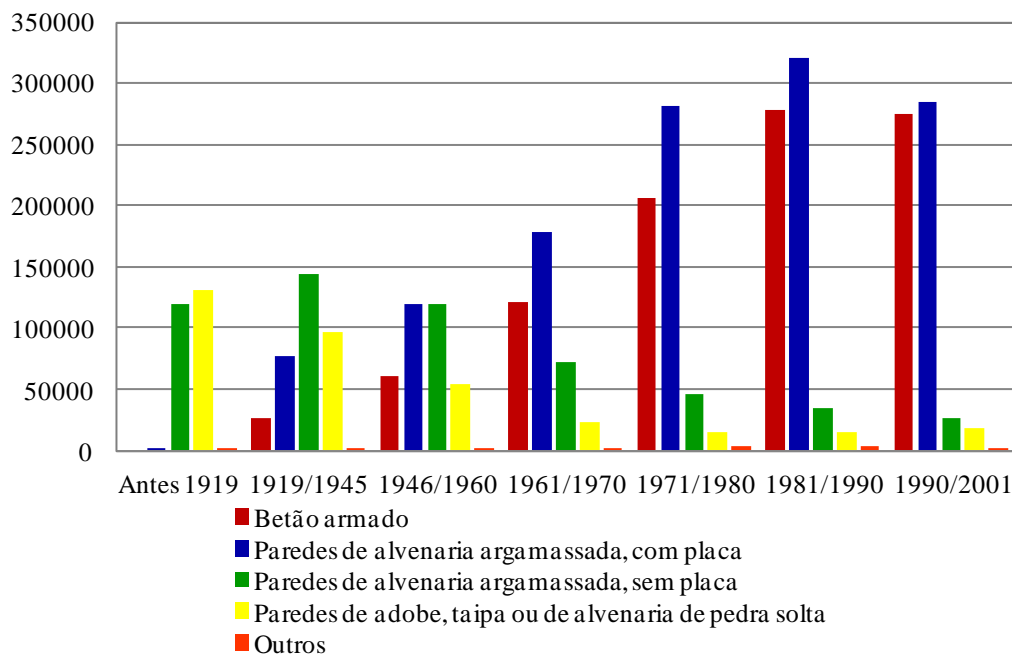


Figura 2.9 - Tipo de estrutura de construção ao longo dos anos (INE, 2001)

2.4.2. Paredes exteriores

Tradicionalmente a fachada é constituída por elementos verticais opacos (paredes exteriores) e por elementos verticais não opacos (vãos envidraçados).

As paredes dos edifícios têm como função a partição entre o espaço exterior e o espaço interior, compartimentação e definição de espaços interiores, com o intuito de garantir a funcionalidade do espaço habitado.

As alvenarias têm sido ao longo dos tempos a solução construtiva usada por excelência para a realização das paredes. Em Portugal, os recursos tradicionais utilizados para alvenaria, além da pedra natural cuja utilização tem vindo progressivamente a reduzir-se, são os tijolos cerâmicos e os blocos de betão de inertes. Os materiais tradicionais são usados com diversas finalidades, tanto para a envolvente exterior da construção, como para a compartimentação interior.

Antes do final da II Guerra Mundial as soluções construtivas das paredes das habitações estavam dependentes das características regionais e condições climáticas das zonas onde eram implantados os edifícios. Nas regiões onde existiam de maciços rochosos o uso de alvenaria em pedra era predominante e permitia construir paredes pesadas e com elevada espessura (Silva, 2007).

A partir do pós-guerra as práticas tradicionais foram progressivamente sendo abandonadas. A evolução económica e social fomentou uma evolução rápida das exigências, que acompanhou igualmente a evolução industrial (Silva, 2007).

Até aos anos 40 as fachadas eram constituídas por um pano de elevada espessura em alvenaria de pedra ou com tijolo maciço. Na década seguinte surgiram as primeiras paredes duplas, com pano exterior de alvenaria de pedra e uma “forra” interior em alvenaria de tijolo. Na década de 60 aligeirou-se a constituição das paredes, utilizando alvenaria de tijolo vazado em ambos os panos. Inicialmente o pano exterior era significativamente mais espesso que o interior mas houve uma progressiva redução dessa espessura até que, já nos anos 70, os dois panos apresentavam dimensões idênticas, e por vezes muito reduzidas (Maxit, 2002).

No que concerne à evolução da tipificação de soluções de paredes exteriores dos edifícios de habitação, as paredes de pano único em pedra e tijolo deram lugar a paredes de tijolo duplas, incorporando variados elementos, tais como isolamento, barreiras pára-vapor, ventilação da caixa-de-ar, escoamento da água e correção das pontes térmicas (Silva, 2007). A evolução pode ser traduzida através da Figura 2.10.

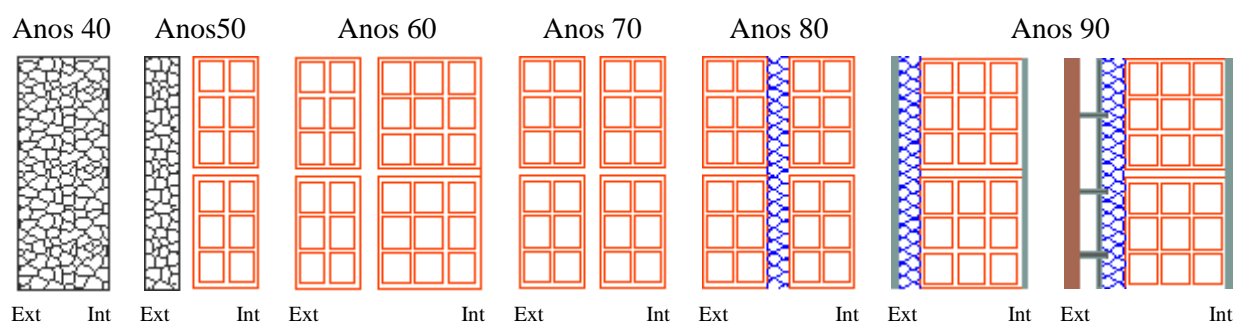


Figura 2.10 - Evolução das paredes exteriores em Portugal

As fachadas têm interferência tanto no exterior como no interior do edifício.

No que respeita ao interior do edifício, a fachada desempenha um papel determinante no conforto higrotérmico dos seus ocupantes. O desempenho ineficiente que se manifesta na incapacidade de proporcionar conforto, resulta também no aumento das necessidades energéticas do edifício, o que pode levar a um excessivo consumo de energia para a climatização do ambiente interior. No que concerne ao exterior, a fachada pode ter influência ao nível do aspeto visual, mas também ao nível ambiental, isto é, o mau desempenho energético da fachada pode também contribuir para um consumo de energia excessivo, o que interfere em termos ambientais ao nível do consumo de recursos esgotáveis e das emissões de gases com efeito estufa (Brito, 2010).

2.4.3. Coberturas

As coberturas são estruturas que se definem pela forma, observando as características de função e estilo arquitetónico das edificações. As coberturas têm como função principal a proteção dos edifícios do ambiente exterior, contra a ação do vento, chuva, neve e intempéries. Estas possibilitam a obtenção de níveis desejados de conforto no interior, através

de isolamentos térmicos e acústicos, respeitando ainda outras funções utilitárias, estéticas e económicas. As coberturas devem satisfazer as seguintes condições (Oliveira, 2009):

- Funções utilitárias: impermeabilidade; secagem rápida após as chuvas; resistência mecânica suficiente para suportar as aberturas de inspeção (ou prever caminhos de circulação); resistência contra o vento; isolamento térmico; incombustibilidade; durabilidade; inalterabilidade de forma e dimensões; leveza para não sobrecarregar a estrutura; facilidade de execução e manutenção;
- Funções estéticas: forma e aspeto em harmonia com a linha arquitetónica, dimensão dos elementos, textura e coloração;
- Funções económicas: custo da solução, durabilidade e potencial de conservação.

As técnicas construtivas para as coberturas de edifícios antigos variam caso se tratem de coberturas inclinadas, coberturas em terraço ou planas, e coberturas curvas.

Existem maioritariamente coberturas inclinadas, que são revestidas em telha cerâmica, lousa de ardósia, colmo, cobre, entre outros. A solução estrutural adotada é a asna de madeira, sobre a qual são colocados um conjunto de elementos de madeira para receção do revestimento. De acordo com a localização do edifício, varia a altura e a inclinação das coberturas, devido à diferente intensidade de precipitação e à neve. Nos edifícios de plantas simples, estas coberturas, podem ter uma (caso de edifícios mais pequenos), duas, três ou quatro águas (Appleton, 2003).

Por sua vez, nas coberturas em terraço as estruturas à base de pedra e tijolo (abóbadas e arcos) são predominantes e não se utilizava madeira devido a ser um material sensível à água. A estanquidade destas coberturas era obtida principalmente através da colocação de argamassas com características impermeabilizantes ou com a colocação de membranas impermeáveis (folhas de chumbo e de zinco). As pendentes devem ser no mínimo de 1%, de modo a garantir um correto fluxo de água (Guimarães, 2009).

As coberturas curvas correspondem normalmente a pequenas zonas das construções, sendo mais frequentes em edifícios de arquitetura religiosa, sendo constituídas por abóbadas e cúpulas. Tal como nos terraços, um problema é assegurar a estanquidade da cobertura, mas a sua forma curva permite escoar a água mais rapidamente (Guimarães, 2009).

A ação da água da chuva é especialmente gravosa nas coberturas, sobretudo em dois tipos distintos de situações: infiltração nas zonas correntes da cobertura, por esta não desempenhar devidamente a sua função, ou infiltrações associadas a disfuncionamentos da rede de drenagem de águas pluviais. Assim, se for posta em causa a estanquidade da cobertura e, se não houver um sistema tradicional de drenagem de águas pluviais, toda a estrutura do edifício pode vir a sofrer as indesejáveis consequências da humidade (Appleton, 2003).

Um bom revestimento de cobertura deverá ser leve, impermeável, incombustível, liso exteriormente e resistente face aos agentes atmosféricos. Deverá ser leve para aliviar a estrutura que suporta o telhado, impermeável para a chuva não entrar para o interior, incombustível para não se inflamar devido à queda de detritos das chaminés, liso

exteriormente de modo a facilitar o escoamento da água de modo a não manter a acumulação de poeiras bem como de parasitas vegetais e resistente aos agentes atmosféricos, por forma a estes não a degradarem nem a destruírem (Guimarães, 2009).

2.5. Fases do processo de reabilitação sustentável nos edifícios

A reabilitação de edifícios é uma atividade fundamental para atingir o desenvolvimento sustentável de um país. Esta tem a capacidade e a responsabilidade de melhorar significativamente a sustentabilidade do parque habitacional existente.

A necessidade de reabilitação no parque habitacional em Portugal é evidente, dado o estado de conservação em que o mesmo encontra. É de extrema importância resolver os problemas correntes do parque habitacional edificado, respondendo simultaneamente à necessidade de melhorar os níveis de sustentabilidade ambiental, económica e social dos mesmos. Deste modo, é essencial enquadrar a atividade de reabilitação de edifícios nos parâmetros da construção sustentável (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Para que uma reabilitação de edifícios de habitação se torne num processo sustentável é necessário que todo o ciclo de vida do edifício responda positivamente aos indicadores da sustentabilidade. É essencial que a eficiência energética, hídrica e a qualidade do ambiente interior do edifício seja aumentada e que, ao mesmo tempo, se reduza o consumo de materiais e a produção de poluentes durante o processo de reabilitação e se diminua o seu impacto ambiental sobre local.

Para que um projeto de reabilitação seja sustentável é necessário abordar de uma forma integrada as diversas fases que compõem o mesmo, tal como se representa a Figura 2.11.



Figura 2.11: Fases do processo de reabilitação a ter em atenção no ciclo de vida de um edifício.

2.5.1. Fase de análise e diagnóstico

A fase de análise e diagnóstico é essencial para uma obra de reabilitação, uma vez que uma análise e avaliação completas ditarão a qualidade da reabilitação e influenciarão as opções de intervenção.

Esta fase deve abordar diversos aspetos, designadamente, históricos, arquitetónicos e construtivos e a análise dos mesmos deve ser realizada a várias escalas: desde o tecido urbano envolvente, ao edifício a reabilitar e aos elementos que o constituem (Paiva *et al*, 2006).

Num processo de reabilitação de edifícios, a fase de análise e diagnóstico deve ser iniciada com estudos preliminares de reconhecimento do estado geral do edifício. Nesta fase é fundamental realizar as seguintes etapas (Lopes, 2010):

- Analisar o estado de conservação e segurança do edifício;
- Identificar todos os tipos de anomalias existentes;
- Avaliar o contexto urbano onde o edifício está inserido - características arquitetónicas e construtivas;
- Identificar as soluções construtivas e materiais existentes.

Numa perspetiva de se atingir a sustentabilidade, nesta fase é ainda importante analisar e avaliar os seguintes aspetos (Lopes, 2010):

- Nível de conforto habitacional - salubridade e conforto oferecido;
- Orientação solar do edifício e a sua inércia térmica;
- Nível de conforto térmico e acústico;
- Iluminação e ventilação natural que possui;
- Consumos energético, até à data;
- Recursos que possam ser reaproveitados.

Para além destes fatores deve ainda ser analisado o enquadramento social do local, uma vez que este poderá alterar as opções a adotar na fase de projeto.

Uma fase de análise e diagnóstico completa torna possível a determinação das ações necessárias para a resolução das anomalias verificadas, permitindo ainda realizar uma previsão dessa intervenção em termos de execução e de custos. Podem assim obter-se nítidos ganhos do ponto de vista económico e da qualidade final da intervenção e simultaneamente reduzir-se o tempo de desenvolvimento do projeto e de execução da obra (Paiva *et al*, 2006).

2.5.2. Fase de projeto

A fase do projeto é a fase determinante em qualquer tipo de intervenção no setor da construção. No caso específico da reabilitação de edifícios, esta fase deve passar, antes de mais, pelo resumo do conhecimento adquirido na fase de análise e diagnóstico, a fim de compreender e a definir prioridades.

Na fase de conceção são tomadas as decisões sobre as intervenções a realizar no edifício, definem-se objetivos e encontram-se soluções a adotar para os atingir, conciliando as

necessidades de reabilitação prioritárias com os objetivos do dono de obra e com as restrições de caráter urbano e legal (Paiva *et al*, 2006).

Um projeto de reabilitação é claramente distinto de um projeto de uma construção nova, uma vez que neste caso, um dos principais objetivos é maximizar a utilização dos recursos existentes, não só em termos de características arquitetónicas, mas também em termos de recuperação e reutilização de recursos materiais.

Nesta fase é fundamental garantir a continuidade dos principais elementos do edifício, sobretudo ao nível da poupança de recursos materiais e de custos. É igualmente importante manter no edifício os traços característicos da arquitetura dos edifícios envolventes (Lopes, 2010).

O objetivo essencial de um projeto de reabilitação é resolver os problemas detetados na fase de análise e diagnóstico e satisfazer os objetivos definidos para a intervenção, definindo as melhores soluções em termos de qualidade, flexibilidade e custo.

Nesta fase é necessário elaborar os vários projetos referentes às diversas especialidades associadas às anomalias encontradas na fase de análise e diagnóstico, como por exemplo: projeto de arquitetura, estruturas, térmica, acústica, abastecimento e drenagem de águas, instalações elétricas e de climatização. Outro aspeto fundamental é a definição das características dos materiais, tecnologias e processos construtivos a implementar em todas as especialidades mencionadas anteriormente (Lopes, 2010).

Para o bom funcionamento do projeto e para a boa execução do mesmo é imprescindível que esta fase seja realizada através de um trabalho conjunto entre os vários intervenientes, os quais devem possuir formação ou experiência em obras de reabilitação. Desta forma, os erros de projeto diminuiriam significativamente, diminuindo-se também os custos adicionais e o tempo de execução.

Para que o processo de reabilitação se torne mais sustentável é essencial que durante esta fase se dê maior relevância a fatores, como por exemplo, o aumento: do desempenho energético do edifício; da qualidade do ar; do conforto térmico; do conforto acústico; da iluminação no interior das habitações; da percentagem de materiais ecoeficientes adotados; e da reutilização dos materiais existentes.

A equipa de projeto deve ter um papel dinamizador e influenciador perante as escolhas do dono de obra, de modo a enquadrar o processo de reabilitação com os parâmetros da construção sustentável. Em suma, esta fase deve definir as melhores soluções em termos de qualidade, flexibilidade e custos.

2.5.3. Fase de construção

A fase de construção é iniciada a partir do momento em que a obra de reabilitação é adjudicada a um empreiteiro. Aquando da adjudicação é importante que sejam verificadas as

qualificações das empresas que executarão as diversas atividades como meio de garantir o sucesso da intervenção.

Dada a elevada percentagem de erros que ocorrem na fase de construção, é indispensável que a escolha da empreitada seja prudente, de modo a que o projeto seja executado corretamente, com menor probabilidade de erros e atrasos. Deve-se ter em especial atenção a escolha de empresas com um sistema de gestão de qualidade implementado.

Numa obra de reabilitação, a fase de construção pode originar problemas a nível social, especialmente se o edifício se encontrar ocupado. Quando se intervém sobre uma área urbana consolidada não se provocam impactes apenas sobre o edifício, mas também sobre a população residente, que utiliza ou trabalha na área, e sobre o património e espaço público envolvente. Neste tipo de situações deve-se garantir que as obras são executadas de forma rápida e eficaz e, simultaneamente, manter a população informada sobre os objetivos da intervenção e duração da atividade. É ainda relevante referir que é fundamental ter em atenção a proteção do património e espaço público envolvente, para que este não seja danificado ou destruído. Relativamente aos aspetos socio-espaciais é indispensável adotar medidas com a finalidade de diminuir o impacte visual e o ruído no decurso da obra (Lopes, 2010).

No que concerne aos níveis de sustentabilidade, é essencial ter em consideração o pilar ambiental durante a fase de construção, uma vez que os fatores ambientais são desprezados normalmente em grande parte pelas empresas de construção. No entanto, esta fase possibilita atingir maiores níveis de sustentabilidade relativamente a diversos aspetos. Nesta etapa devem ser tomadas medidas que diminuam o impacto ambiental sobre o local de implantação, prevenindo-se a poluição do ar e dos solos, assim como a degradação das características ecológicas do local (Ruivo e Viega, 2004).

2.5.4. Fase de utilização e/ou manutenção

A eficiência e sustentabilidade durante a fase de utilização de um edifício dependem, sobretudo, dos utilizadores e dos seus hábitos quotidianos. Atualmente, embora se presencie a uma forte aposta na consciencialização da população para os danos ambientais que os seus hábitos poucos sustentáveis provocam, ainda são poucas as mudanças verificadas (Lopes, 2010).

Torna-se imperativo inverter a tendência verificada na fase de utilização dos edifícios de habitação. Para tal, e uma vez que o edifício foi projetado para garantir uma maior eficiência no consumo de recursos, e um aumento da qualidade do ambiente interior e da eficiência energética, torna-se necessário incentivar e investir na formação dos futuros utilizadores, para que estes possam utilizar o edifício da forma mais eficiente possível.

A equipa de projeto tem um papel fundamental na consciencialização e formação dos utilizadores do edifício, relativamente à sua sustentabilidade. Com o objetivo de que a utilização do edifício seja realizada de acordo com o previsto, em termos de eficiência e conforto, é necessário que seja elaborado um manual de utilização para os ocupantes. Este

manual tem como objetivo informar aos utilizadores como devem utilizar diariamente o seu edifício de forma a obter o desempenho previsto na fase de projeto, relativamente aos sistemas, soluções e tecnologias adotadas (Lopes, 2010).

O manual de utilização deve conter informação referente ao modo de utilização dos sistemas de climatização, sistemas de ventilação, sistemas de distribuição de água, periodicidade das limpezas e manutenções correntes, materiais aconselhados para as mesmas e informação acerca de todos os materiais e produtos aplicados na habitação, como por exemplo: materiais de construção, lâmpadas e eletrodomésticos.

Para além do manual de utilização deve também ser desenvolvido um manual de manutenção. Este último deve conter informação idêntica ao anterior mas referente ao edifício em geral, espaços e equipamentos comuns, envolvente do edifício, zona exterior, entre outros.

Outra medida que deve ser tomada para que durante a fase de utilização se mantenham os níveis de eficiência e conforto é a implementação de sistemas de monitorização, com o objetivo de detetar possíveis erros ou anomalias nos diversos sistemas e tecnologias adotados (Amado, 2007).

2.5.5. Fase de desconstrução

A fase de desconstrução pode ser realizada de uma forma sustentável. No entanto, para que este processo se torne ambientalmente mais positivo, em relação à situação atual, é necessário que sejam tomadas medidas desde o início do ciclo de vida do edifício, nomeadamente, nas fases de projeto e de construção. Na fase de projeto algumas das medidas que devem ser tomadas para possibilitar uma gestão eficiente dos resíduos de construção e demolição eficiente e sustentável são: adotar materiais com elevada capacidade de reciclagem e maior capacidade de reutilização; selecionar materiais que não originem resíduos de construção e demolição com substâncias nociva; e preferir um tipo de ligação entre materiais que possibilite uma fácil separação no final da vida útil do edifício (Lopes, 2010).

2.6. Incentivos existentes à Reabilitação Urbana

As cidades vão assistindo à degradação progressiva das suas estruturas urbanas, dos seus edifícios e dos seus espaços exteriores. Esta degradação é decorrente do próprio envelhecimento, da sobrecarga de usos, ou ainda do desajustamento da organização a novos modos de vida. Por isso, torna-se imprescindível o desenvolvimento de processos de reabilitação urbana integrada, racionalizando recursos e evitando intervenções dispersas que possam revelar-se contraditórias.

O Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana, I.P. (IHRU), é um Instituto Público integrado na administração indireta do Estado, dotado de autonomia administrativa e financeira e património próprio. Estre prossegue atribuições do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, sob superintendência e tutela do respetivo ministro, e tem por missão assegurar a concretização da política definida pelo Governo para as áreas da habitação

e da reabilitação urbana, de forma articulada com a política de cidades e com outras políticas sociais e de salvaguarda e valorização patrimonial, assegurando a memória do edificado e a sua evolução (IHRU, 2011).

Herdeiro de uma longa experiência, iniciada com o Fundo de Fomento de Habitação, até ao Instituto Nacional de Habitação, passando pelo Instituto de Gestão e Alienação do Património Habitacional do Estado, o IHRU assume um protagonismo essencial ao desenvolvimento de uma política integrada nas áreas de habitação, da reabilitação urbana e da salvaguarda do património arquitetónico (IHRU, 2011):

- Como coordenador na identificação dos problemas específicos dessas áreas;
- Como catalisador da pesquisa de novos modelos e dinâmicas habitacionais;
- Como dinamizador de novos suportes legislativos e regulamentares;
- Como entidade nacional certificadora de projetos de habitação e reabilitação urbana;
- Como entidade coordenadora dos instrumentos de financiamento aplicáveis;
- Como entidade gestora de um largo património de habitação do Estado;
- Como mobilizador de estudos e intercâmbio de experiências com vista a propor medidas de melhoria nas áreas de habitação e reabilitação urbana.

O Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana tem sob sua orientação quatro programas de apoio e incentivo à reabilitação dos edifícios, como por exemplo o RECRIA, o REHABITA, o RECRIPH e o SOLARH. Estes programas têm como objetivo incentivar a intervenção dos privados no património construído; resolver deficiências e anomalias construídas, ambientais e funcionais acumuladas ao longo do tempo; procurar a modernização e beneficiação dos imóveis, melhorando o seu desempenho funcional e tornando-os aptos para o seu completo uso (Sepúlveda, 2007).

2.6.1. Programas de incentivo à Reabilitação Urbana

a) RECRIA

O Regime Especial de Participação na Recuperação de Imóveis Arrendados (RECRIA) visa financiar a execução das obras de conservação e beneficiação que permitam a recuperação de fogos e imóveis em estado de degradação, mediante a concessão de incentivos pelo Estado e pelos municípios.

Podem aceder a este regime senhorios e proprietários que procedam a obras nos fogos e/ou nas partes comuns dos prédios, assim como os inquilinos e os municípios que se substituam aos senhorios na realização dessas mesmas obras, desde que no imóvel haja pelo menos um fogo cuja renda tenha sido objeto de correção extraordinária ou seja de tal suscetível (Portal da Habitação, 2012a)).

Os incentivos só podem ser atribuídos uma vez por imóvel e não são acumuláveis com quaisquer outros subsídios, participações ou bonificações concedidas pelo Estado, com exceção dos atribuídos no âmbito do programa SOLARH.

Este programa de incentivo considera o seguinte tipo de obras para compartilhar (Portal da Habitação, 2012a)):

- Obras de conservação ordinária;
- Obras de conservação extraordinária;
- Obra de beneficiação, que se enquadrem na lei geral ou em regulamentos municipais e se tornem necessárias para a concessão de licença de utilização.

Enquadra-se no RECRIA a seguinte legislação (Portal da Habitação, 2012a)):

- Portaria n.º 1172/ 2010, de 10 de novembro - fixa, para 2011, o preço da construção por metro quadrado, para efeitos de cálculo da renda condicionada;
- Portaria n.º 56-A/2001, de 29 de janeiro - fórmula de cálculo para a concessão das comparticipações a fundo perdido;
- Decreto-Lei n.º 329-C/2000, de 22 de dezembro (suplemento) – revoga os Decretos-Lei n.º 197/92, de 22 de setembro, e 104/96, de 31 de julho;
- Decreto-Lei n.º 329-A/2000, de 22 de dezembro – altera o regime de renda condicionada;
- Decreto-Lei n.º 418/99, de 21 de outubro – introduz alterações no Código do IVA e harmoniza-o com a Lei Geral Tributável. As empreitadas realizadas no âmbito do RECRIA passam a ser tributadas à taxa reduzida;
- Decreto-Lei n.º 104/96, de 31 de julho - primeira alteração ao Decreto-Lei n.º 197/92;
- Decreto-Lei n.º 197/92, de 22 de setembro - reformula o Regime Especial de Comparticipação na Recuperação de Imóveis Arrendados e revoga o Decreto-Lei n.º 4/88, de 14 de janeiro;
- Decreto-Lei n.º 4/88, de 14 de janeiro - cria do Regime Especial de Comparticipação na Recuperação de Imóveis Arrendados (RECRIA).

b) RECRIPH

O Regime Especial de Comparticipação e Financiamento na Recuperação de Prédios Urbanos em Regime de Propriedade Horizontal (RECRIPH) visa apoiar financeiramente a execução de obras de conservação nas partes comuns de edifícios, constituídos em regime de propriedade horizontal.

Podem aceder a este regime as administrações de condomínio que procedam a obras nas partes comuns de prédios urbanos e os condomínios que procedam a obras nas frações dos mesmos, desde que, cumulativamente (Portal da Habitação, 2012b)):

- Os edifícios tenham sido construídos até à data de entrada em vigor do Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU), aprovado pelo Decreto-Lei n.º 38382 de 7 de agosto de 1951, ou após essa data, os que tenham licença de utilização emitida até 1 de janeiro de 1970;
- As frações autónomas de prédio sejam destinadas a habitação própria e permanente dos condóminos ou estejam arrendadas para fins habitacionais, admitindo-se a existência de uma fração afeta ao comércio ou à pequena indústria hoteleira;
- Os imóveis sejam compostos por, pelo menos, quatro frações autónomas.

Neste programa são comparticipadas e financiadas o seguinte tipo de obras (Portal da Habitação, 2012b)):

- Obras de conservação ordinária e extraordinária nas partes comuns dos prédios;
- Obras de conservação e de beneficiação de frações autónomas, desde que tenham já sido realizadas todas as obras necessárias nas partes comuns do prédio ou desde que tenha havido deliberação da assembleia de condóminos no sentido da sua execução.

No programa RECRIPH enquadra-se a seguinte legislação (Portal da Habitação, 2012b)):

- Decreto-Lei n.º 106/96 de 31 de julho;
- Portaria n.º 711/96 de 9 de dezembro.

c) *SOLARH*

O programa SOLARH visa estimular a reabilitação do parque habitacional detido por estratos habitacionais com menores rendimentos, através do apoio financeiro à realização de obras de conservação e de beneficiação em habitação própria permanente ou em habitações devolutas, mediante a concessão de empréstimos sem juros pelo Instituto de Habitação e Reabilitação.

Este programa permite a concessão de empréstimos sem juros pelo IHRU, para realização de obras de conservação (Portal da Habitação, 2012c)):

- Em habitação própria permanente de indivíduos ou agregados familiares;
- Em habitações devolutas de que sejam proprietários os municípios, as instituições particulares de solidariedade social, as pessoas coletivas de utilidade pública administrativa que prossigam fins assistenciais, e as cooperativas de habitação e construção;
- Em habitações devolutas de que sejam proprietárias pessoas singulares.

Neste tipo de programa existe três tipos de condições de acesso (Portal da Habitação, 2012c)):

i) Obras de conservação/beneficiação em habitação própria e permanente:

- Pode candidatar-se o proprietário (pessoa individual ou o agregado familiar) desde que o seu rendimento anual bruto seja igual ou inferior a duas vezes e meia o valor anual da pensão social por cada indivíduo maior até ao segundo; duas vezes o valor anual da pensão social por cada indivíduo maior a partir do terceiro e uma vez o valor anual da pensão social por cada indivíduo menor.
- A habitação objeto das obras a financiar deve ser propriedade de um ou mais membros do agregado familiar há, pelo menos, cinco anos;
- Nenhum dos membros do agregado familiar pode ser proprietário, no todo ou em quota superior a 25%, de outro prédio ou fração autónoma destinada à habitação, nem receber rendimentos decorrentes da propriedade de quaisquer bens imóveis;
- Nenhum dos membros do agregado familiar pode ter contraído qualquer outro empréstimo destinado à realização de obras na habitação a financiar.

ii) Obras de conservação e de beneficiação em habitações devolutas:

- Podem candidatar-se ao programa os municípios, as instituições particulares de solidariedade social, as pessoas coletivas de utilidade pública administrativa com fins assistenciais, e as cooperativas de habitação e construção, se forem titulares da

propriedade plena ou do direito de superfície de habitação, objeto das obras a financiar.

iii) Obras de conservação e de beneficiação em habitações devolutas propriedade de pessoas singulares:

- Podem candidatar-se os titulares da propriedade plena ou do direito de superfície da habitação objeto das obras a financiar, desde que no prédio em que esta se integra exista, pelo menos, uma habitação arrendada, cuja renda tenha sido objeto de correção extraordinária, nos termos da Lei n.º 46/85 de 20 de setembro, ou seja, suscetível da mesma.

No programa SOLARH enquadra-se a seguinte legislação (Portal da Habitação, 2012c)):

- Decreto-Lei n.º 25/2002 de 11 de fevereiro;
- Decreto-Lei n.º 39/2001 de 9 de fevereiro;
- Decreto-Lei n.º 418/99, de 21 de outubro.

d) REHABITA

O Regime de Apoio à Recuperação Habitacional em Áreas Urbanas Antigas (REHABITA) consiste numa extensão do Programa RECRIA e visa apoiar financeiramente as Câmaras Municipais na recuperação de zonas urbanas antigas (Portal da Habitação, 2012d)).

O acesso a este programa pressupõe a celebração de acordos de colaboração entre o IHRU, as Câmaras Municipais e outras instituições de crédito autorizadas.

O financiamento no âmbito do REHABITA destina-se a apoiar a execução de obras de conservação, de beneficiação ou de reconstrução de edifícios habitacionais e as ações de realojamento provisório ou definitivo, daí recorrentes, no âmbito de operações municipais de reabilitação dos núcleos urbanos históricos que sejam declarados como áreas críticas de recuperação e reconversão urbanística, nos termos do art.º 41.º do Decreto-Lei n.º 794/76, de 5 de novembro, e que possuam planos de pormenor ou regulamentos urbanísticos aprovados e aos centros urbanos reconhecidos nos termos dos n.º 2 e 3 do art. I do Decreto-Lei n.º 426/89 de 6 de dezembro, relativo às Medidas Cautelares contra o Risco de Incêndio (Portal da Habitação, 2012d)).

As obras participáveis pelo REHABITA ao abrigo do RECRIA, destinadas ao realojamento provisório ou à elaboração de projetos ou fiscalização, têm uma percentagem adicional, a fundo perdido, de 10%, a suportar pelo IHRU e pelo município na proporção estabelecida pelo RECRIA, desde que conste da previsão da candidatura (Portal da Habitação, 2012d)).

Nas situações em que as operações de reabilitação e de renovação urbana impliquem a construção ou aquisição de fogos para realojamento provisório ou definitivo de agregados familiares, o município terá que os atribuir em regime de renda apoiada e sujeitá-los ao regime de intransmissibilidade previsto no Programa Especial de Realojamento (PER) (Portal da Habitação, 2012d)).

Para a construção ou aquisição desses fogos, o município pode obter uma comparticipação até 40% a fundo perdido, concedida pelo IHRU e um financiamento bonificado até 40%, diretamente do IRHU ou através de instituições de crédito (Portal da Habitação, 2012d)).

A Legislação para se enquadra neste programa de reabilitação é a seguinte:

- Decreto-lei n.º 329-B/2000, de 22 de dezembro;
- Decreto-Lei n.º 329-A/2000, de 22 de dezembro;
- Decreto-Lei n.º 105/96, de 31 de julho;
- Portaria n.º 1172/2010, de 10 de novembro.

CAPÍTULO 3 - SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS PARA A REABILITAÇÃO DA ENVOLVENTE EXTERIOR DE UM EDIFÍCIO DE HABITAÇÃO

3.1. Enquadramento

As intervenções de reabilitação em edifícios habitacionais, em que se integram medidas para promoção da eficiência energética e economia, assumem uma grande importância entre as diversas intervenções de reabilitação.

Segundo dados do Instituto Nacional de Estatística, o parque habitacional português encontra-se degradado e apresenta uma qualidade construtiva deficiente. Com estes dados conclui-se que há necessidade de requalificar e preservar o parque habitacional existente, evitando a sua degradação física, adotando níveis de conforto e salubridade mínimos. O nível de degradação no parque habitacional justifica-se pelo facto de não ser objeto de intervenções de manutenção/reabilitação regulares, pela falta de qualidade dos materiais, processos e sistemas construtivos empregues nos edifícios, e pelo facto da época de construção ser prévia à existência da regulamentação térmica de edifícios (INE, 2009).

A reabilitação energética de um edifício existente é uma abordagem inovadora, que tem por objetivo melhorar a qualidade térmica e racionalizar a gestão da energia, ou seja, conferir a esse edifício uma eficiência energética idêntica à de um edifício novo.

A eficiência energética de edifícios envolve a redução do consumo de energia para níveis aceitáveis de conforto, a qualidade do ar interior e outros requisitos ocupacionais, incluindo a energia utilizada para a construção.

As medidas de reabilitação energética podem ser essencialmente de quatro tipos (Paiva *et al*, 2006):

- i) Reforço da proteção térmica conferida pela envolvente dos edifícios;
- ii) Controlo das infiltrações de ar;
- iii) Recurso a tecnologias solares, passivas e ativas;
- iv) Melhoria da eficiência energética dos sistemas e equipamentos energéticos.

A combinação simultânea de diferentes tipos de soluções pode produzir sinergias ao permitir reforçar frequentemente o efeito de cada uma delas. No entanto, por vezes só quando se opta por uma determinada solução é que o efeito de outra medida é completamente assegurado.

As medidas de reabilitação devidamente planeadas, para além de conduzirem à redução das necessidades de energia de aquecimento ou arrefecimento, podem surtir outros efeitos colaterais muito benéficos, nomeadamente (Paiva *et al*, 2006):

- Melhoria das condições de conforto dos edifícios;
- Redução da potência dos equipamentos dos sistemas de climatização a instalar ou a reabilitar;

- Redução das emissões de dióxido de carbono, monóxido de carbono, nitratos e sulfatos, que têm um impacto intensamente negativo sobre a saúde da população e ambiente.

De seguida são apresentadas algumas soluções de reabilitação térmica para a envolvente vertical exterior de edifícios de habitação.

3.2. Reabilitação de Paredes Exteriores

Qualquer que seja a região do país considerada, uma parede de alvenaria de pedra de grande espessura, ou uma parede de fachada em alvenaria de tijolo não possui condições de cumprir o coeficiente de transmissão térmica superficial máximo, estipulado no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

Ainda que o valor obtido para o coeficiente de transmissão térmica duma parede – U, esteja dentro dos valores admissíveis, a sua aproximação aos valores máximos irá forçar que sejam encontradas soluções para outros parâmetros, dos quais depende a eficiência térmica da fração autónoma, tornando irracional e antieconómica a solução global (Santos, 2007).

A promoção do conforto térmico, traduzido num controlo mais eficiente da temperatura ambiente interior, irá traduzir-se na necessidade de melhorar o isolamento da envolvente exterior dos edifícios. O isolamento térmico, por outro lado, reduzirá as perdas de energia, permitindo regular a temperatura interior do edifício durante a estação de aquecimento, e por outro lado, durante o verão impedirá que a temperatura exterior atravesse para o interior, protegendo-o (Santos, 2007). Na estação de aquecimento, o isolamento tanto reduz as perdas de calor como mantém as superfícies internas a uma temperatura superior à que teria se não fosse isolada.

O reforço do isolamento térmico das paredes exteriores admite três grandes opções, caracterizadas pelas diferentes localizações possíveis do isolamento térmico a aplicar (Paiva *et al*, 2006):

- Isolamento térmico exterior;
- Isolamento térmico interior;
- Isolamento térmico na caixa-de-ar (limitando-se apenas ao caso de paredes duplas).

A seleção do tipo de solução a utilizar é condicionada por quatro fatores de diversa ordem e de diferentes situações (Paiva *et al*, 2006):

- Se por condicionamentos arquitetónicos houver necessidade que o paramento exterior se tenha de manter, o reforço do isolamento térmico pelo interior é a solução viável;
- Se não houver os condicionamentos referidos anteriormente e o paramento exterior se encontre em bom estado e isento de defeitos significativos, o reforço de isolamento a aplicar tanto pode ser pelo exterior como pelo interior;
- Caso não existam condicionamentos arquitetónicos e o aspeto do paramento exterior se apresente sensivelmente degradado, a solução mais indicada consiste em aplicar o reforço pelo exterior;

- Se as áreas interiores forem de pequena dimensão e o paramento exterior não apresente condicionantes de ordem arquitetónica, a solução mais indicada será o reforço do isolamento térmico pelo exterior.

No caso de paredes constituídas apenas por um só pano, paredes simples, o reforço do isolamento térmico pode ser realizado pelo exterior ou pelo interior. O reforço do isolamento térmico pelo exterior, desde que não seja inviabilizado por constrangimentos de ordem arquitectónica, constitui em geral a melhor solução, dado que as vantagens superam nitidamente os inconvenientes, em comparação com a solução de isolamento pelo interior, (Quadro 3.1) (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Quadro 3.1: Vantagens e inconvenientes do isolamento térmico exterior de fachadas em relação ao isolamento interior (ADENE & LNEC & INETI & IPQ, 2004)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Isolamento térmico mais eficiente; - Protecção das paredes contra agentes atmosféricos - Ausência de descontinuidade na camada isolante - Supressão de “pontes térmicas” e redução dos riscos de condensação - Conservação da inércia térmica das paredes - Manutenção das dimensões dos espaços interiores - Menores riscos de incêndio e de toxicidade; - Manutenção da ocupação dos edifícios durante as obras; - Dispensa de interrupções nas instalações interiores e de trabalhos de reposição de acabamentos; - Eventual melhoria do aspecto exterior dos edifícios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Constrangimentos arquitectónicos; - Constrangimentos de ordem técnica; - Maior vulnerabilidade da parede ao choque, sobretudo no rés-do-chão; - Custo em regra mais elevado (aproximadamente o dobro); - Condicionamento dos trabalhos pelo estado do tempo; - Risco de fendilhação dos revestimentos (em soluções com revestimentos contínuos).

3.2.1. Soluções de Isolamento Térmico Exterior

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior, quando esta solução é possível, apresenta sempre vantagens relativamente à aplicação pelo interior, nomeadamente no que diz respeito à preservação da inércia térmica interior do edifício para funcionar como acumulador térmico.

Os materiais compactos, e as paredes de elevada espessura (com grande inércia térmica), têm grande capacidade de armazenamento térmico, quer a energia absorvida provenha da radiação solar, quer de outra fonte de aquecimento.

A aplicação do isolamento térmico pelo exterior apresenta ainda outras vantagens, como a melhoria do desempenho da parede à penetração da chuva, a minimização dos riscos de incêndio e de toxicidade, ou a possibilidade de ocupação humana do edifício durante o decorrer das obras (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Existem diversas soluções para a aplicação do isolamento térmico exterior, sendo as de utilização mais corrente de dois tipos: revestimentos independentes descontínuos, com

interposição de um isolante na caixa-de-ar e sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimentos sobre isolante (Quadro 3.2).

Quadro 3.2: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolamento térmico é pelo exterior (Paiva *et al*, 2006)

Tipos de soluções	Revestimentos não isolantes independentes, com interposição dum isolante térmico na caixa-de-ar.	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos independentes descontínuos (elementos fixados mecanicamente). - Revestimentos independentes contínuos de ligantes minerais armados (rebocos armados e desligados do suporte).
	Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimentos sobre o isolante.	<ul style="list-style-type: none"> - Revestimentos espessos de ligantes minerais armados (rebocos armados e desligados do suporte), sobre o isolante. - Revestimentos delgados de ligantes sintéticos ou mistos, armados sobre isolantes.
	Revestimentos isolantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Vêtures - Rebocos isolantes - Revestimentos de espuma isolante projetada

a) *Revestimentos independentes descontínuos, com interposição de um isolante térmico na caixa-de-ar*

As soluções de revestimentos independentes descontínuos com interposição de um isolante na caixa-de-ar consistem na colocação de uma camada de isolamento térmico, fixado diretamente à parede através de uma estrutura de suporte metálica ou em madeira, formada por montantes e travessas, sobre a qual é colocado um revestimento independente exterior constituído por elementos descontínuos, tal como apresentado na Figura 3.1 (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

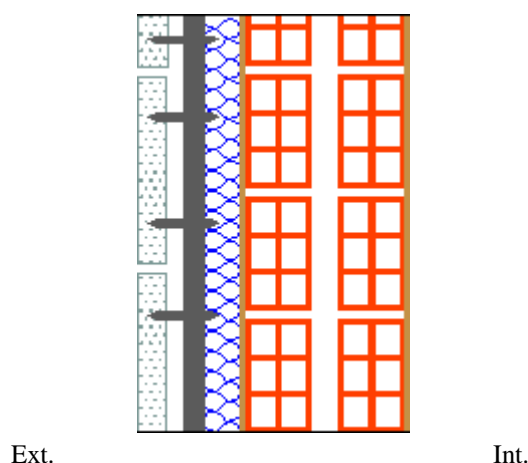


Figura 3.1: Exemplo ilustrado da solução de revestimentos independentes descontínuos com interposição de isolante térmico na caixa-de-ar

Entre o revestimento e o isolante é deixada uma caixa-de-ar fortemente ventilada com o mínimo de 0,02m, que dificulte o contacto do isolamento com a água, preservando assim as suas características térmicas. Em qualquer caso, deve-se procurar sempre minimizar as

possibilidades de infiltração de água. Para isso deve-se prestar o maior cuidado à proteção e recobrimento dos topos superiores, laterais e inferiores do sistema (Paiva *et al*, 2006).

b) Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento aplicado sobre o isolante

Nos países nórdicos, onde existem invernos rigorosos, foi desenvolvido um sistema de isolamento térmico de edifícios pelo exterior, em que são fixadas placas de isolamento térmico à parede e sobre estas assenta um reboco modificado, que assegura a impermeabilidade, a integridade do isolamento contra os choques e a decoração do paramento.

Estes sistemas de isolamento térmico pelo exterior com revestimento aplicado sobre isolante são correntemente conhecidos pela sigla ETICS¹. Os mesmos foram desenvolvidos para evitar transferências de calor para um exterior frio, funcionando também adequadamente para evitar transferências de calor a partir do exterior demasiado quente, atuando assim como uma barreira à transferência de calor (Santos, 2007).

Nesta solução, o reboco acaba por desempenhar um papel estrutural, pois este assenta sobre uma superfície com baixa compacidade e elasticidade, daí que tenha de possuir uma tenacidade suficiente para proteger o isolamento contra as ações do exterior, assegurando a estanquidade do paramento. Para assegurar esta funcionalidade, o reboco deve ter boa aderência ao isolamento, ser hidrófugo e tem de estar armado, pois a armadura vai conferir-lhe a resistência e assegurar a integridade do sistema (Paiva *et al*, 2006).

Existem dois subtipos de ETICS, que se distinguem pela espessura do revestimento aplicado: sistemas de isolamento térmico com revestimento espesso sobre o isolante e sistemas de isolamento por revestimento delgado sobre o isolante.

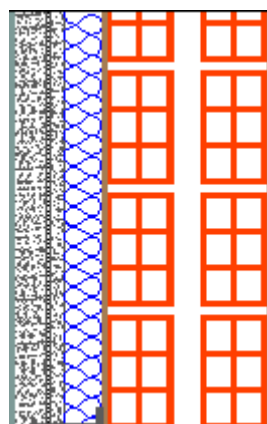
b.1) Sistemas de isolamento térmico com revestimento espesso sobre o isolante

Os sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante, representados na Figura 3.2, são constituídos por (Paiva *et al*, 2006):

- Um material de isolamento em placas colado ao suporte;
- Um revestimento de ligantes hidráulicos armados com rede metálica, sobre a qual poderá ser aplicado um revestimento delgado de massas plásticas ou uma tinta.

As placas de isolamento deverão ter ranhuras na face a revestir a fim de melhorar a aderência do revestimento. A armadura do revestimento, em geral de aço galvanizado, deverá ter ligações pontuais de natureza mecânica ao suporte, isto é, cavilhas ou grampos.

¹ ETICS, acrónimo da denominação de origem inglesa “External Thermal Insulation Composite Systems”



Ext.

Int.

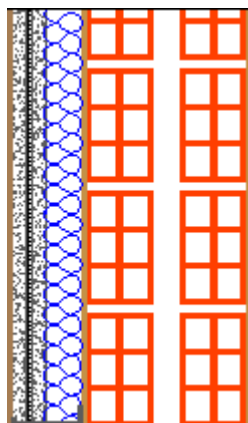
Figura 3.2: Exemplo de uma solução de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento espesso

b.2) Sistemas de isolamento térmico com revestimento delgado sobre o isolante

Os sistemas de isolamento térmico com revestimento delgado sobre o isolante, representados na Figura 3.3, são constituídos por (Paiva *et al*, 2006):

- Um material de isolamento em placas colado ao suporte ou fixo mecanicamente;
- Um revestimento delgado de ligante misto, armado com uma rede flexível, quase sempre em fibra de vidro, formando-se assim a camada base do revestimento;
- Um revestimento de acabamento, em geral um revestimento delgado de massas plásticas, formando-se assim a camada de acabamento de revestimento.

As placas de isolamento são fixadas ao suporte por colagem ou por ligação mecânica.



Ext.

Int.

Figura 3.3: Exemplo da solução de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento delgado

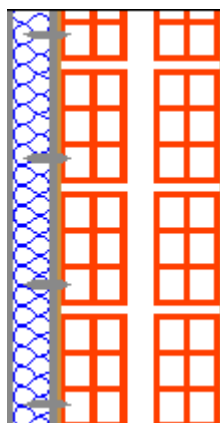
c) Revestimentos Isolantes

Um revestimento diz-se isolante quando este é capaz de complementar o isolamento térmico exigível em geral ao sistema parede – revestimento.

c.1) Sistemas de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados

Os sistemas de isolamento térmico por elementos descontínuos prefabricados, *vêtures*, são obtidos a partir de elementos previamente produzidos em fábrica, constituídos por um material isolante em placas revestido exteriormente por uma película de natureza metálica, mineral ou orgânica. Este tipo de elementos chega à obra pronto a aplicar, sendo a sua fixação aos suportes efetuada por meios mecânicos (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Nesta solução de reabilitação (Figura 3.4), uma vez que o isolante e o revestimento são prefabricados, a aplicação em obra é feita numa operação única, dispensando-se algumas fases, quando comparando com outras soluções de isolamento térmico pelo exterior de fachadas.



Ext.

Int.

Figura 3.4: Exemplo da solução de painéis isolantes prefabricados

Por ser industrializado este sistema baseia-se essencialmente em processos organizados de natureza repetitiva, totalmente mecanizados, mas que apresentam, algumas dificuldades de adaptação a pontos singulares das fachadas.

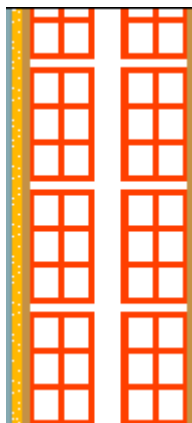
Os dispositivos de fixação do sistema ao suporte devem atravessar toda a espessura do conjunto revestimento - isolante, para que estes se mantenham em conjunto. Como este sistema não comporta caixa-de-ar ventilada entre o revestimento e o isolamento, compete ao isolamento térmico servir de suporte ao revestimento e participar na estanquidade do conjunto, para além das exigências térmicas normais. Desta forma o isolamento terá que apresentar as características mecânicas e de comportamento sob a ação da água necessárias para o bom desempenho do sistema (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Na conceção de um sistema *vêture* devem-se ter em atenção alguns aspetos: configuração das juntas entre elementos; limitação do risco de ocorrência de condensações no interior do material de isolamento; e adaptação aos pontos singulares dos suportes.

No que respeita às juntas, devem ser adotadas disposições que as tornem suficientemente estanques, mas que ao mesmo tempo permitam uma certa movimentação entre elementos devido a ajustes de posição, a variações dimensionais por ação da temperatura ou à deformação do suporte.

c.2) Rebocos Isolantes

Nesta solução aplicam-se revestimentos constituídos por argamassas que incorporam grânulos de um isolante térmico (por exemplo poliestireno expandido) de pequena dimensão, com vista à redução da sua condutibilidade térmica em relação à das argamassas de rebocos tradicionais (Figura 3.5) (Paiva et al, 2006).



Ext.

Int.

Figura 3.5: Exemplo de uma solução de rebocos isolantes

Considerando a espessura normal dos rebocos exteriores, a sua condutibilidade térmica não pode ser comparada com a dos isolantes térmicos (Paiva *et al*, 2006). Com a aplicação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico (RCCTE, 2006), este recurso não pode por si só ser considerado para a reabilitação térmica de paredes, sem dispensar a adoção de outras medidas complementares.

3.2.2. Soluções de Isolamento Térmico pelo Interior

As soluções de isolamento térmico pelo interior têm como base a utilização de um isolante térmico localizado entre a superfície interior do elemento de alvenaria que constitui a parede exterior e uma solução de revestimento. as soluções de revestimento é em geral constituída por painéis de gesso cartonado, eventualmente por placas de madeira ou derivados, e em alguns casos por um revestimento de ligantes hidráulicos ou mistos aplicados em obra (Santos, 2007). O Quadro 3.3 resume as soluções de isolamento térmico pelo interior.

Quadro 3.3: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores pelo interior (Paiva *et al*, 2006)

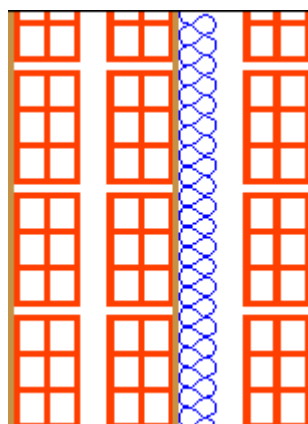
Tipos de soluções	Painéis isolantes prefabricados, em geral com altura de andar, fixados contra a parede.
	Contrafachadas <ul style="list-style-type: none">- Com caixa-de-ar simples.- Com interposição de um isolante térmico e sem caixa-de-ar.- Com interposição de um isolante térmico e com caixa-de-ar.
	Revestimentos refletores

Dos três tipos de soluções de isolamento térmico interior apresentados no Quadro 3.3, apenas as duas primeiras constituem soluções aplicáveis em superfícies correntes.

a) *Contrafachada executada no lado interior da parede*

Este tipo de solução é baseado na execução de uma contrafachada no lado interior da parede a reabilitar e na incorporação de um isolante térmico entre a parede exterior e essa contrafachada (Figura 3.6) (Paiva *et al*, 2006).

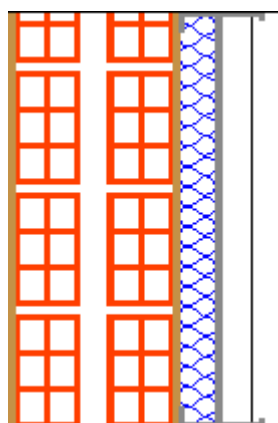
Sempre que viável, recomenda-se que seja deixada uma caixa-de-ar entre a parede pré-existente e o isolamento térmico, com a função de proteger do eventual acesso de chuva incidente no caso desta atravessar o pano exterior.



Ext. Int.
Figura 3.6: Exemplo da execução de uma contrafachada em alvenaria

b) *Painéis isolantes prefabricados*

Este tipo de sistema recorre a painéis com a altura de pé direito, que associam um paramento de gesso cartonado (Figura 3.7) e uma camada de isolamento térmico realizada com placas de poliestireno expandido moldado ou extrudido, coladas ao tardo das placas de paramento (Paiva *et al*, 2006).



Ext. Int.
Figura 3.7: Exemplo da execução de uma contrafachada em gesso cartonado

3.2.3. Soluções de Isolamento Térmico em Caixa-de-ar

O reforço do isolamento térmico das paredes duplas por preenchimento da caixa-de-ar permite manter o aspeto exterior e interior das mesmas e reduzir ao mínimo as operações de reposição dos respetivos paramentos, que ficam limitadas à vedação dos furos de injeção (Figura 3.8). A injeção de isolamento na caixa-de-ar torna-se uma solução possível, sempre que esta seja acessível (Jardim, 2009).

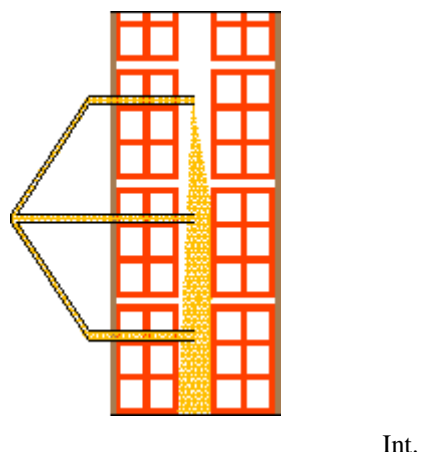


Figura 3.8: Exemplo ilustrativo da injeção de isolamento térmico na caixa-de-ar

Esta solução é aplicável exclusivamente a edifícios em que as paredes exteriores sejam construídas por dois panos. O reforço do isolamento térmico por preenchimento da caixa-de-ar é, nestes casos, a solução mais económica e mais simples de executar. Para a sua concretização, basta abrir furos de injeção.

No Quadro 3.4 encontram-se apresentadas as soluções de reforço de isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolante é na caixa-de-ar.

Quadro 3.4: Soluções de reforço do isolamento térmico de paredes exteriores em que a localização do isolamento térmico é na caixa-de-ar (Paiva *et al.*, 2006)

Tipos de soluções	Injeção de produtos isolantes a granel	- Fibras ou flocos.
		- Grânulos de material isolante.
	Injeção de espumas isolantes	- Espuma rígida de poliuretano.
		- Espuma de ureia-formaldeído.

3.3. Reabilitação de Coberturas

A cobertura é o elemento construtivo que está sujeito às maiores flutuações térmicas. Como elemento essencial dos edifícios, que o protegem da precipitação e atenuam as flutuações de temperatura, as coberturas, mais do que qualquer outro elemento construtivo do edifício necessita de estar em boas condições de funcionamento.

Nos edifícios de habitação, as coberturas são identificadas como o ponto de maior fragilidade, porque delas partem muitas das disfunções e patologias, pelo que são também o ponto mais preocupante.

O primeiro aspeto a considerar aquando de uma reabilitação numa cobertura existente, é a sua qualidade térmica. Mesmo que o objetivo primordial da intervenção seja eliminar uma patologia, como por exemplo a entrada de água da chuva, nunca se deve perder a oportunidade de melhorar o desempenho energético da cobertura, porque, quase sem exceções, esta melhoria terá enormes benefícios no que refere ao conforto ambiental, salubridade e economia no consumo de energia associada ao conforto (Tirone, 2011).

Na generalidade, as coberturas existentes não dispõem de isolamento térmico ou, quando este existe é insuficiente ou está mal aplicado. Neste importante elemento, o isolamento, sempre que bem aplicado, resolve muitos dos problemas relacionados com a qualidade do ambiente interior, entre eles (Paiva et al, 2006):

- Aumenta o conforto durante o inverno, pois reduz as perdas térmicas e reduz o fluxo ascendente de calor gerado no interior do edifício;
- Aumenta o conforto durante o verão, isto é, reduz os ganhos de calor devido à temperatura exterior e à exposição direta da cobertura à radiação solar, reduzindo a entrada de calor pela cobertura resultante da conjugação das duas situações referidas;
- O fenómeno indesejado das condensações diminui quando se uniformizam e atenuam as temperaturas das superfícies em contacto com o ar interior;
- Assegura a longevidade dos materiais estruturais que constituem a cobertura, porque reduz a sua exposição às amplitudes térmicas típicas do clima português.

A execução de reforço no isolamento térmico em coberturas depende do tipo de cobertura, ou seja, se a mesma é inclinada ou horizontal.

O Quadro 3.5 sistematiza as soluções de isolamento térmico para o reforço de isolamento térmico nas coberturas.

Quadro 3.5: Soluções de reforço do isolamento térmico em coberturas (Paiva *et al*, 2006)

Localização do isolamento térmico		Tipos de solução
Nas vertentes	Superior	Painéis isolantes especiais, integrando varas, forro e isolante térmico. Mantas de material isolante, sobre laje inclinada. Placas de material isolante, sobre laje inclinada.
	Inferior	Mantas de material isolante (recobertas eventualmente com um forro inferior) <ul style="list-style-type: none"> - Fixadas contra as varas de cobertura - Fixadas contra régua dispostas sob as varas e ao longo destas - Cruzadas em 2 camadas, com interposição de régua normais às varas - Fixadas contra laje inclinada
		Placas de material isolante <ul style="list-style-type: none"> - Fixadas contra as varas de cobertura - Fixadas contra laje inclinada
		Projeção de espumas isolantes

Localização do isolamento térmico		Tipos de solução	
Na esteira	Superior	Mantas de material isolante	
		Placas de mineral isolante	
		Material isolante a granel	- Fibras ou flocos - Grânulos de material isolante
	Inferior	Revestimentos isolantes	- Revestimentos descontínuos (placas fixadas mecanicamente ou coladas)
		Tetos-falsos	- Teto-falso isolante - Teto-falso suportando uma camada de isolamento térmico

3.3.1. Coberturas Inclinadas

No que concerne às coberturas inclinadas existem várias configurações, que dependem essencialmente da região climática e do posicionamento do isolamento. Consideram-se dois procedimentos de reforço de isolamento, que se diferenciam pelo elemento da cobertura no qual se aplica o isolante térmico (Paiva *et al*, 2006):

- Isolamento aplicado na esteira horizontal (caso o desvão não seja habitável);
- Isolamento aplicado nas vertentes (caso o desvão seja habitável)

a) *Isolamento aplicado na esteira Horizontal*

Sempre que o desvão não seja habitável, é preferível aplicar a camada de isolamento térmico sobre a esteira horizontal (Figura 3.9), eventualmente protegida superiormente se o desvão for acessível, e assegurar uma franca ventilação do desvão. Este tipo de solução é mais económica, quando comparada com o isolamento das vertentes, pois a quantidade de isolamento utilizada poderá ser menor, e a sua aplicação é em geral mais fácil (Paiva *et al*, 2006).

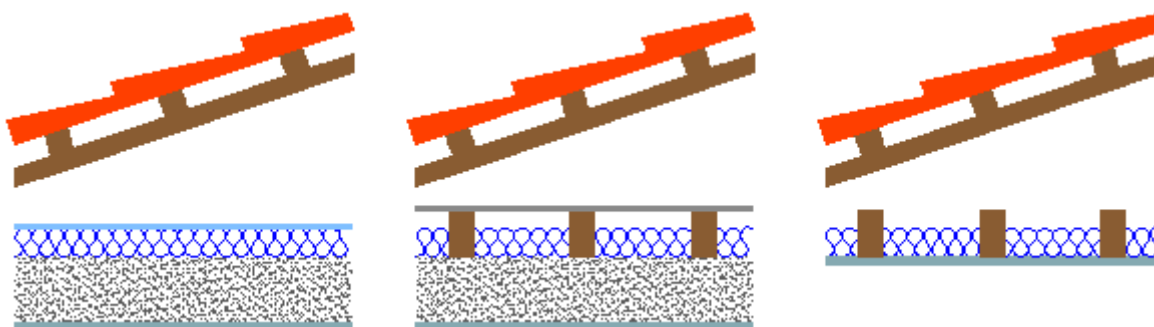


Figura 3.9: Coberturas inclinadas com desvão não-habitável – isolamento térmico na esteira horizontal

b) *Isolamento nas vertentes*

As soluções de isolamento térmico aplicado nas vertentes das coberturas inclinadas (Figura 3.10) devem ser apenas reservadas para as situações em que o desvão seja habitável.

Entre as várias hipóteses de colocação do isolamento para esta solução, aconselha-se que o isolamento térmico seja colocado sobre a estrutura da cobertura, nas vertentes. Do ponto de

vista energético é preferível esta solução, sobretudo quando existe uma estrutura de laje, uma vez que se tiramos partido da inércia térmica dos elementos subjacentes ao isolamento (Rocha, 2008).

Como é possível a entrada de água de chuva pelas juntas do revestimento, recomenda-se a proteção na parte superior do isolamento térmico com uma camada impermeabilizante que impeça a passagem da água no estado líquido e a consequente humedecimento do isolante, sem contudo criar uma barreira pára-vapor do lado exterior do mesmo, o qual provocaria condensações internas. Caso não seja possível remover o revestimento exterior da cobertura, as soluções de isolamento térmico ficam limitadas à sua aplicação na face inferior da estrutura da cobertura.

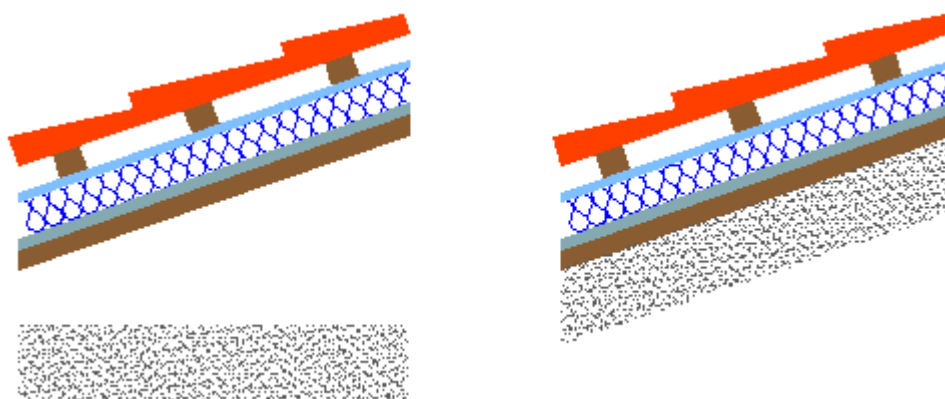


Figura 3.10: Coberturas inclinada com desvão habitável – isolamento térmico nas vertentes

3.3.2. Coberturas Horizontais

Para o reforço do isolamento térmico das coberturas horizontais, existem três grandes opções, dependentes da localização desse isolamento (Paiva *et al*, 2006):

- Isolamento térmico superior;
- Isolamento térmico intermédio;
- Isolamento térmico inferior.

a) *Isolamento térmico na posição superior*

Existem dois tipos de soluções de aplicação do isolamento térmico em posição superior:

- Cobertura invertida;
- Isolante térmico suporte de impermeabilização.

a.1) *Coberturas invertidas*

O sistema de cobertura invertida foi inicialmente estabelecido como um modelo alternativo ao sistema designado por cobertura tradicional, no decorrer dos anos 60. A divulgação e utilização desse sistema cresceu nos últimos anos, como forma de solucionar problemas de impermeabilização em coberturas tradicionais (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

Na cobertura invertida invertem-se as posições relativas convencionais dos sistemas de impermeabilização e isolamento térmico, ou seja, neste caso o isolamento térmico encontra-se sobre a impermeabilização como se pode visualizar na Figura 3.11.

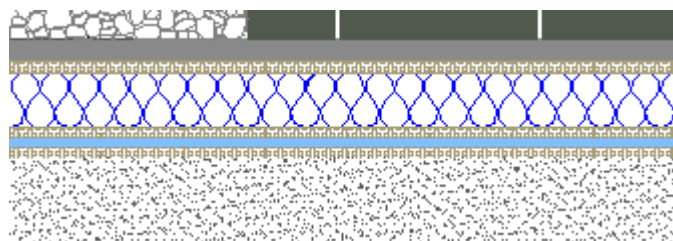


Figura 3.11: Aplicação de impermeabilizações e isolamento térmico em coberturas invertidas

Neste tipo de solução, o isolamento térmico é aplicado sob a forma de placas sobre a impermeabilização. Superiormente é protegido pela aplicação de uma proteção pesada, que impede que as placas de isolamento se desloquem sob a ação do vento ou da flutuação em água, e protege-as da radiação solar, cuja componente ultravioleta provocaria a sua degradação.

As placas de poliestireno extrudido (XPS) são o isolante térmico mais adequado para realizar uma solução de cobertura invertida.

a.2) Isolante térmico como suporte de impermeabilização

Na presente solução o isolante térmico pode ser simplesmente apoiado sem fixação sobre a impermeabilização existente, o que implica a realização de uma proteção pesada que contrarie as ações de sucção devidas à ação do vento, caso contrário terá de ser necessário fixar o isolamento térmico e a nova impermeabilização (Figura 3.12) (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

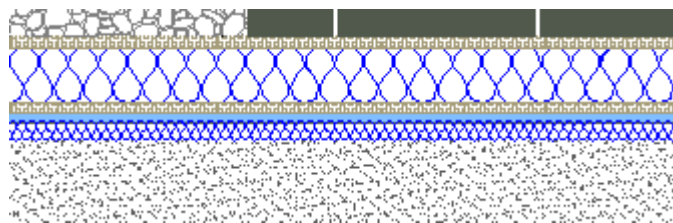


Figura 3.12: Aplicação de isolante térmico sobre impermeabilização existente

A impermeabilização existente, mesmo que degradada, pode ser mantida. Se as degradações apresentadas, no entanto, dificultarem, quer a aplicação do isolante quer a realização de uma barreira pára-vapor justificada pelas condições higrométricas dos espaços subjacentes à cobertura, impõe-se a remoção da impermeabilização.

É necessário assegurar uma boa fixação do novo sistema, no caso de se prever uma nova solução de impermeabilização. A aderência das entre as camadas (suporte/isolante e impermeabilização/isolante) da solução existente é sempre difícil de verificar e de garantir. Por esse facto é aconselhável o recurso a uma fixação mecânica, pelo menos do novo isolante ao suporte estrutural. A nova impermeabilização poderá em seguida ser totalmente aderida ao isolante.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA ADOTADA

4.1. Objetivos

A evolução da sustentabilidade dos edifícios insere-se numa ótica de controlo e progresso ao nível dos diversos fatores que influenciam: recursos, poluição, biodiversidade, imposições culturais e sociais, limitações económicas e qualidade ambiental.

Um edifício só poderá ser considerado sustentável se as três diferentes dimensões da sustentabilidade (ambiental, social e económica) forem consideradas em todo o seu ciclo de vida.

Os diversos aspetos da sustentabilidade estão diretamente relacionados com o edifício e com a interação que este exerce com a sua envolvente. Na maior parte das políticas de promoção da sustentabilidade é comum encontrarem-se os seguintes objetivos (Bragança, Mateus e Koukkari, 2007):

- Otimizar o potencial do local de implantação;
- Preservar a identidade regional e cultural;
- Minimizar o consumo energético;
- Proteger e conservar os recursos;
- Utilizar materiais eco-eficientes;
- Assegurar níveis adequados para as condições de saúde e conforto;
- Otimizar as práticas de utilização e manutenção;
- Minimizar os custos de ciclo de vida.

A reabilitação é considerada uma atividade indispensável à obtenção de um futuro sustentável. Socialmente esta atividade opõe-se à situação de crescimento desordenado nas periferias das cidades, em contraste com os respetivos centros urbanos cada vez mais deteriorados. Do ponto de vista económico e ambiental, o prolongamento da vida útil das construções em utilização até ao limite possível do seu envelhecimento natural, torna-se numa opção vantajosa.

4.2. Descrição do caso de estudo

Para a realização do caso de estudo recorrer-se-á a um edifício virtual que equivale a uma moradia unifamiliar, localizada na região do Minho, designadamente no Concelho de Guimarães. O edifício em questão apresenta uma geometria quadrangular, estando implementado num terreno orientado a sul, Figura 4.1.

O edifício em questão é constituído por um piso com 64m² de área útil de pavimento e 2,7m de pé-direito livre. As paredes exteriores são constituídas por um pano duplo de alvenaria de tijolo vazado de 0,11m, separados por uma caixa-de-ar de 0,03m e rebocados em ambas as faces. No que respeita à cobertura esta é inclinada, com quatro águas e com desvão não habitável. A esteira horizontal é composta por uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e

abobadilhas cerâmicas com 0,25m de espessura e 0,02m de reboco para revestimento inferior do teto. A esteira inclinada é constituída por telhas cerâmicas apoiadas sobre uma estrutura de madeira. Os vão envidraçados são em vidro simples e caixilharia em alumínio, correspondendo a 22% da área de pavimento.

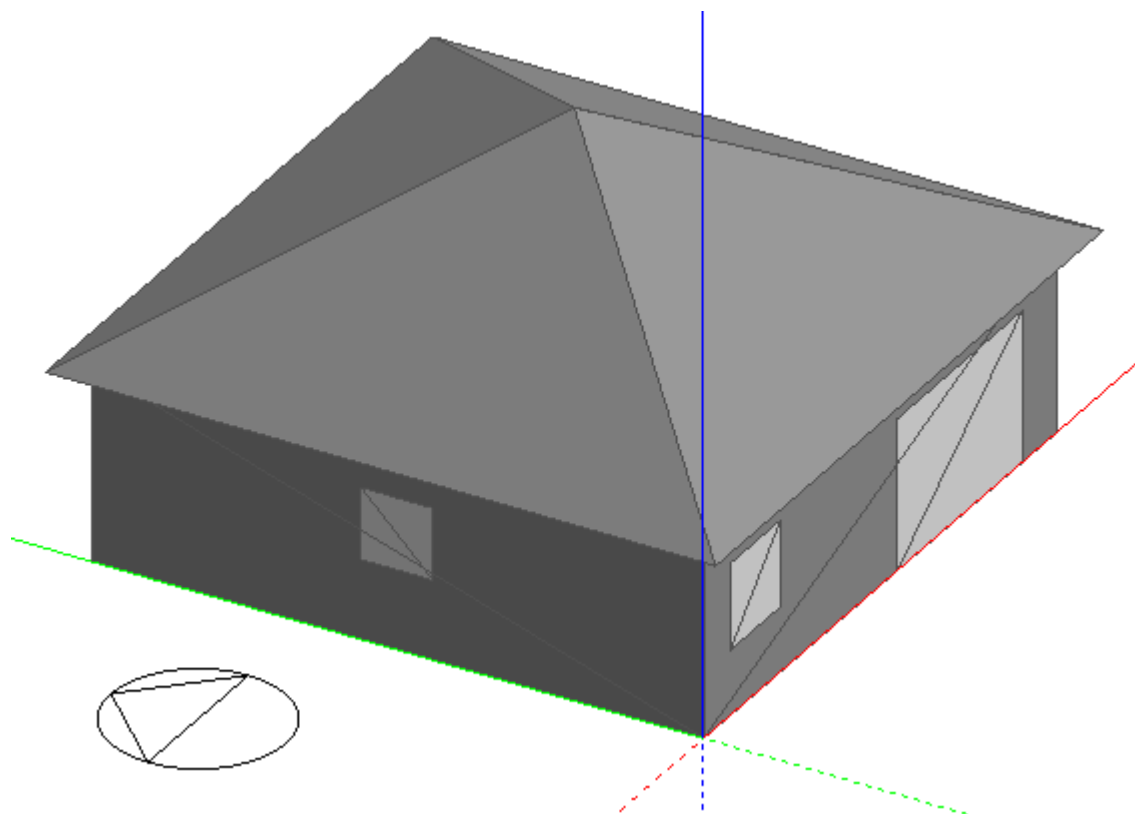


Figura 4.1: Representação do edifício em estudo

4.3. Metodologia de análise comparativa da sustentabilidade das soluções de reabilitação

Numa avaliação da sustentabilidade podem ser abordados vários parâmetros, os quais nem sempre estão correlacionados entre si e não se expressam na mesma grandeza.

A sustentabilidade é assim uma questão relativa, que deve ser avaliada comparativamente e relativamente à prática corrente, ou seja, tendo por base uma determinada solução de referência para um determinado local ou país. Deste modo, é possível verificar se, ao nível de cada parâmetro analisado, a solução em estudo é melhor ou pior que a solução de referência. O patamar mínimo de sustentabilidade deve corresponder, numa primeira fase, à solução com mais expressão no mercado, devendo ser ajustado ao longo do tempo em função do desenvolvimento tecnológico. A solução mais sustentável depende daquilo que o limite tecnológico pode proporcionar em cada momento (Mateus *et al*, 2006).

Neste trabalho, propõem-se que a avaliação da sustentabilidade das soluções construtivas se realize através de uma metodologia de análise relativa, cuja base de comparação é, para cada elemento construtivo, a solução de reabilitação mais aplicada – solução de referência.

A metodologia a implementar será a Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC). Nesta metodologia propõe-se que a sustentabilidade das soluções construtivas seja avaliada relativamente à solução de referência, isto é, a solução construtiva mais aplicada para um determinado local. Nesta metodologia são considerados três dimensões: o ambiental, o funcional e o económico (Mateus *et al*, 2006).

Nas Figura 4.2 representa-se esquematicamente as etapas de aplicação da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas.



Figura 4.2: Representação esquemática da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas (MARS-SC)

4.3.1. Quantificação dos parâmetros

Nesta fase, estabelece-se o número e tipo de parâmetros a analisar em cada um dos indicadores. A definição dos parâmetros a analisar depende dos objetivos da avaliação, das características próprias das soluções construtivas, das exigências funcionais que se pretendam satisfeitas, das características particulares do local e dos dados disponíveis (Mateus *et al*, 2006)

A quantificação de alguns parâmetros mencionados nem sempre é fácil. Por exemplo, o potencial de reciclagem e o potencial de reutilização são parâmetros difíceis de expressar numericamente. Estes parâmetros dependem de alguns fatores como o estado de conservação dos materiais ou produtos que compõem a solução construtiva no final do ciclo da sua vida útil, das soluções arquitetónicas e construtivas correntes numa determinada época, do modo como os produtos ou materiais de construção se encontram ligados entre si, do estágio de

desenvolvimento tecnológico ao nível das soluções de reciclagem, o que hoje não é possível reciclar, talvez no futuro o venha a ser, etc.

Nos últimos anos, a ISO e o CEN têm-se destacado no desenvolvimento de ações de normalização no âmbito da avaliação da sustentabilidade dos edifícios.

A ISO, através da norma ISO/TC 21929-1 (2006) fornece o enquadramento e as orientações para o desenvolvimento e seleção de indicadores de sustentabilidade adequado para os edifícios. Esta norma aborda a avaliação do desempenho ambiental, social e económico de um edifício. Na Figura 4.3 encontram-se apresentados os indicadores ambientais, sociais e económicos previstos na norma ISO/TC 21929-1.

Ambientais	Sociais	Económicos
<ul style="list-style-type: none"> • Alterações climáticas; • Destruição da camada de ozono; • Acidificação; • Eutrofização; • Formação de oxidantes fotoquímicos; • Esgotamento de recursos não renováveis; • Formação de poluentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualidade dos edifícios; • Efeitos da construção relacionados com a saúde e segurança dos utilizadores; • Acessibilidade; • Satisfação dos utilizadores; • Qualidade arquitectónica dos edifícios; • Protecção do património cultural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Investimento; • Utilização; • Desconstrução e tratamento de resíduos; • Desenvolvimento do valor económico do edifício; • Receitas geradas pela construção.

Figura 4.3: Indicadores de sustentabilidade de edifícios (ISO/TC 21929-1, 2006)

Na aplicação da MARS-SC às soluções construtivas analisadas neste trabalho são considerados cinco parâmetros ambientais, dois funcionais e um económico (Figura 4.4).

Ambientais	Funcionais	Económicos
<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de Esgotamento das Reservas de Combustíveis Fosseis (FFDP); • Potencial de Aquecimento Global (GWP); • Potencial de Acidificação (AP); • Potencial de Eutrofização (EP); • Potencial de Oxidação Fotoquímica (POCP). 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo total de energia (kWh/m². ano); • Redução sonora aparente e isolamento sonoro normalizado ou padronizado ($D_{2m,nT,W}$ ou $D_{nT,W}$). 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de reabilitação (€/m²)

Figura 4.4: Parâmetros a analisar na metodologia MARS-SC

4.3.1.1. Parâmetros ambientais

O desempenho ambiental de uma solução construtiva pode ser caracterizado através de vários parâmetros: massa da solução, energia primária incorporada, potencial de aquecimento global, potencial de reciclagem, potencial de reutilização, toxicidade dos materiais utilizados, quantidade de água utilizada na sua produção, etc. (Mateus *et al*, 2006).

A análise do Ciclo de Vida, LCA¹ é um dos principais métodos associados à quantificação da sustentabilidade dos edifícios. Esta é uma metodologia analítica que tem como objetivo avaliar os potenciais impactes ambientais associados ao ciclo de vida de produtos manufaturados, assim como as consequências desses impactes na população e no meio ambiente (Mateus, 2009).

As aplicações mais importantes das ferramentas de análise de ciclo de vida são (Bragança e Mateus, 2011):

- Análise do contributo das diversas fases do ciclo de vida para o impacte ambiental global.
- Comparação entre produtos para comunicação interna ou externa.

O método LCA encontra-se normalizado pela Organização Internacional de Normalização (ISO 14040) desde a segunda metade dos anos 90. Inicialmente, pensou-se que LCA poderia ser uma boa ferramenta para suportar as qualidades ambientais de um produto em campanhas de *marketing*, mas, com o passar dos anos, foi-se tornando evidente que esta não era a melhor aplicação do LCA (PRé-consultants, 2008). Estas ferramentas além de comunicarem os resultados de LCA de uma forma criteriosa e bem balanceada, ainda se apresentam extremamente úteis para a otimização dos processos produtivos das empresas, desde a extração das matérias-primas até ao produto final. A avaliação do desempenho ambiental dos produtos, assente na totalidade do seu ciclo de vida, tornou-se um aspeto fundamental nas novas políticas ambientais.

Outros aspetos que têm catalisado a importância das ferramentas LCA são os relatórios de sustentabilidade das empresas, a avaliação da sustentabilidade da construção e, nos últimos anos, o desenvolvimento das Declarações Ambientais de Produtos - EPD's².

A norma ISO 14040 refere que o objetivo de estudo de avaliação do ciclo de vida deve expor de forma clara a aplicação planeada as razões para levar até ao fim o estudo e a audiência pretendida, ou seja, a quem irão ser comunicados os resultados. A análise do ciclo de vida assenta na análise e comparação dos impactes ambientais de um produto, a partir de um inventário de entradas e saídas. Segundo as Normas ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) o estudo do ciclo de vida pode dividir-se em quatro etapas essenciais: Definição dos Objetivos e Âmbito; Inventário de Ciclo de Vida; Avaliação dos Impactos de Ciclo de Vida; e Interpretação dos dados e resultados (Figura 4.5).

¹ Acrónimo da expressão Inglesa *Life-Cycle Assessment* (*Análise de Ciclo de Vida*)

² Acrónimo da expressão Inglesa *Environmental Product Declarations* (*Declaração Ambiental dos Produtos*)

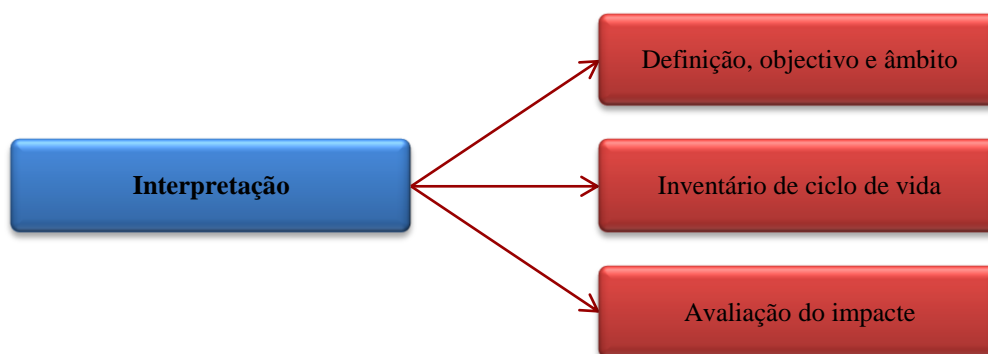


Figura 4.5: Fases de implementação do LCA (ISO 14040, 2006)

A Avaliação de Ciclo de Vida apresenta ainda três variantes, em função das fases de ciclo de vida que são estudadas: cradle-to-grave (do berço à sepultura), cradle-to-gate (do berço à porta) e cradle-to-cradle (do berço ao berço).

Uma análise cradle-to-grave inclui a totalidade do ciclo de vida de um produto, desde a extração das matérias-primas, considerado do berço, até à fase de deposição, sepultura, passando pela fase de utilização, Figura 4.6.

Numa análise cradle-to-gate só se considera uma parte do ciclo de vida do produto, àquela que vai desde a extração, até à porta da fábrica, isto é, englobam-se todos os processos anteriores ao seu transporte até ao consumidor final, Figura 4.7. A fase de utilização e deposição de um produto são geralmente omitidas. Este tipo de avaliação está geralmente na base das Declarações Ambientais de Produto, EPDs.

A análise cradle-to-cradle é uma variante da análise cradle-to-grave, na qual a última fase do ciclo de vida de um produto corresponde a um processo de reciclagem, Figura 4.8.

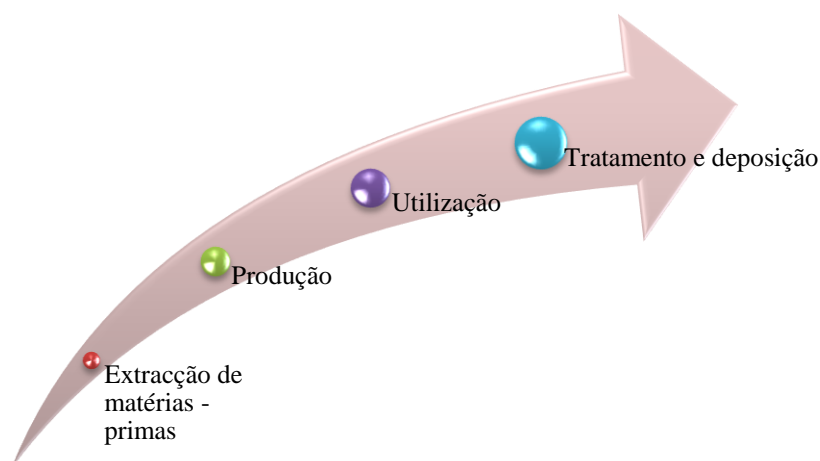


Figura 4.6: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-grave

As metodologias LCA abordam detalhadamente a dimensão ambiental, através da avaliação do desempenho da solução ao nível de algumas categorias de impacte ambiental, mas na maior parte das vezes não abordam as outras dimensões do desenvolvimento sustentável. No entanto existem algumas metodologias LCA mais completas que incluem o desempenho económico na avaliação.

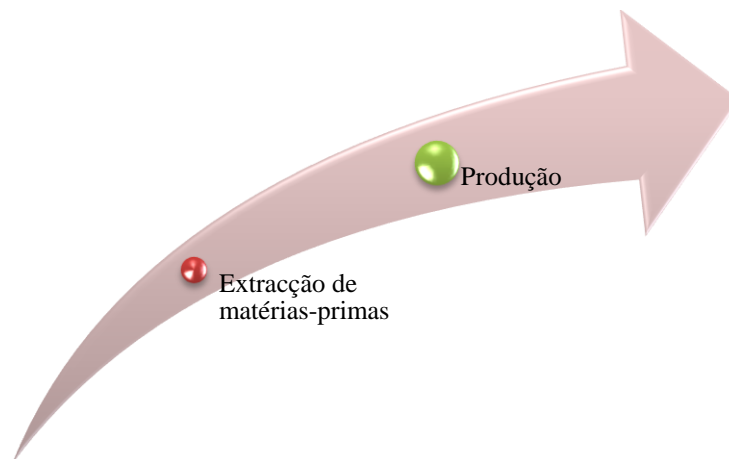


Figura 4.7: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-gate

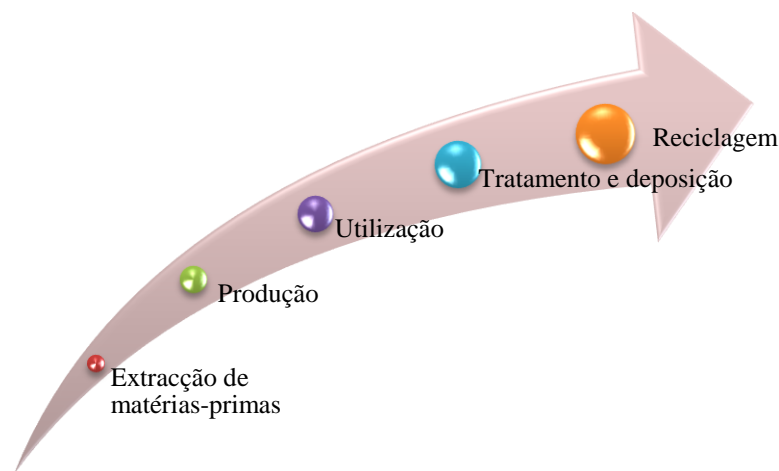


Figura 4.8: Representação esquemática das fases de ciclo de vida na análise cradle-to-cradle

As vantagens de efetuar uma análise do ciclo de vida baseiam-se sobretudo na possibilidade de realizar uma análise comparativa dos diversos cenários requeridos e posteriormente seleccionar os materiais mais sustentáveis tendo em conta o seu impacto ambiental. Uma outra vantagem é a possibilidade de obter conhecimento relativamente aos custos iniciais, de manutenção, utilização, demolição, reutilização e reciclagem, ou seja, aos custos relativos ao ciclo de vida.

O processo de Avaliação do Ciclo de Vida pode ser facilitado através da utilização de programas informáticos que foram desenvolvidos com o intuito de auxiliar a quantificação dos impactos ambientais de ciclo de vida de um produto ou serviço, como por exemplo: SimaPro (Países Baixos), Gabi (Alemanha), Eco-Quantum (Países Baixos), EcoEffect (Suécia), ENVEST (Reino Unido), LISA (Reino Unido), ATHENA (Canadá) e LCA House (Finlândia). A maioria destas ferramentas encontra-se baseada numa abordagem *bottom-up*, isto é, o impacto global de um edifício resulta no somatório do impacto de cada um dos seus materiais e componentes (Bragança e Mateus, 2011).

Neste trabalho utilizou-se a ferramenta informática SimaPro (PRé-consultants, 2010). O SimaPro é uma ferramenta que engloba várias bibliotecas de inventário do ciclo de vida, bem como diferentes métodos de avaliação. As bibliotecas desta ferramenta abrangem bancos de

dados, sendo o Ecoinvent o mais utilizado e conhecido, uma vez que este apresenta inventários de ciclo de vida com um maior número de processos (PRé-consultants, 2012a)).

Os métodos de avaliação de Ciclo de Vida LCA, incluídos na ferramenta SimaPro são (PRé-consultants, 2012b)):

- Ecoindicator 99;
- Ecoindicator 95;
- CML 1992;
- CML 2000;
- EDIP /UMIP;
- EPS 2000;
- Ecopoints 97;
- Impact 2002+;
- TRACI;
- EDP method;
- Cumulative Energy Demand;
- IPCC Greenhouse gas emissions.

A ferramenta SimaPro (PRé-consultants, 2010) permite efetuar a avaliação do ciclo de vida para as diferentes soluções construtivas, através de oito indicadores ambientais, resumindo-se em seis categorias de impacto ambiental, uma de energia renovável e uma de energia não renovável. Os indicadores ambientais a caracterizar com recurso ao SimaPro são os seguintes:

- Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos (ADP);
- Potencial de acidificação (AP);
- Potencial de aquecimento global ou efeito de estufa (GWP);
- Potencial de destruição da camada de ozono estratosférico (ODP);
- Potencial de formação de ozono troposférico (POCP);
- Potencial de eutrofização (EP);
- Energia renovável incorporada (ER);
- Energia não renovável incorporada. (ENR).

Como todas as ferramentas de avaliação de ciclo de vida, o SimaPro requer o cumprimento de uma série de passos e a introdução correta dos dados no programa de modo a que sejam obtidos resultados com o máximo de rigor.

Tendo em conta a lista de categorias de impacto ambiental em análise neste trabalho será empregue o método CML 2000 para a avaliação de impactes ambientais e o Cumulative Energy Demand para a determinação da energia primária incorporada. De seguida apresenta-se resumidamente os métodos de LCA utilizados no presente trabalho

4.3.1.1.1. CML Baseline 2000

A escolha do método CML 2000 deve-se a variadas razões, destacando-se as seguintes (CML, 2001):

- É uma abordagem aconselhada e com o reconhecimento científico;

- Baseia-se no desenvolvimento do estado de arte;
- É uma metodologia Europeia;
- Uma abordagem orientada a problemas, ou seja, é definida um nível médio aos indicadores;
- Permite quantificar as categorias de impacto ambiental definidas para o presente estudo.

Para além do que foi referido anteriormente, este método apresenta uma listagem de categorias de avaliação impacto agrupados:

- Categorias de impacto obrigatórias (na maior parte dos indicadores utilizados no LCA);
- Categorias adicionais de impacto (onde existem indicadores operacionais, mas que não são inseridos no estudo LCA);
- Outras categorias de impacto (não existem indicadores operacionais disponíveis, logo impossível de serem incluídos quantitativamente no estudo LCA).

O método CML 2 baseline 2000 é um método “multifase” com uma abordagem orientada para o problema, seguindo as recomendações ISO 14040 (2006).

O método CML 2 (2000) é uma atualização do método CML (1992), sendo um dos primeiros métodos de avaliação, desenvolvido e utilizado em vários países. O seu nome está relacionado com a entidade onde foi desenvolvido - o Centro de Gestão Ambiental da Universidade de Leiden, Holanda (CML, 2001).

Seguidamente apresenta-se resumidamente as categorias de impacto ambiental estudadas (Bragança & Mateus, 2011).

a) Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos – ADP

Esta categoria de impacto ambiental está relacionada com a proteção do conforto e saúde do ser humano e com a preservação dos ecossistemas. A categoria ADP tem como objetivo avaliar o problema ambiental relacionado com a disponibilidade decrescente dos recursos naturais.

Entende-se por recursos naturais os minerais e materiais encontrados na terra, mar ou atmosfera, incluindo os combustíveis fósseis. O seu valor está relacionado com a quantidade de cada material combustível fóssil extraído e assenta nas reservas disponíveis e taxa de decréscimo das mesmas. A ADP exprime-se em quilogramas de antimónio equivalente (Sb) por quilograma de recurso extraído. Este indicador tem repercussões à escala global

b) Potencial de acidificação – AP

A acidificação é o processo onde as emissões para o ar (principalmente de amónia (NH₃), dióxido de enxofre (SO₂) e óxido de azoto (NO_x)) são convertidas em substâncias ácidas. O dióxido de enxofre é formado pela queima de combustíveis fósseis como, por exemplo o carvão, que contém quantidades elevadas de enxofre; o óxido de azoto é produzido por várias atividades industriais e está presente nas emissões do setor dos transportes.

Este indicador expressa-se em quilogramas equivalentes de SO₂ por cada quilograma de emissões para a atmosfera.

c) Potencial de aquecimento global ou efeito de estufa – GWP

As alterações climáticas podem resultar em efeitos adversos para a saúde humana, preservação dos ecossistemas e desempenho dos materiais.

Esta categoria está relacionada com a emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera e expressa-se em Potencial de Aquecimento Global para um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100), em quilogramas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂) por quilograma de emissão libertada para a atmosfera.

Este indicador tem repercussões à escala global e está relacionado não apenas com as propriedades radioativas das emissões, mas também com a escala de tempo que caracteriza a remoção da substância na atmosfera.

d) Potencial de destruição da camada de ozono estratosférico – ODP

Com a destruição da camada de ozono estratosférico aumenta a quantidade de radiação UV-V que atinge a superfície terrestre. Esta situação pode apresentar efeitos negativos na saúde humana, saúde dos animais, equilíbrio dos ecossistemas terrestres, aquáticos e ciclos bioquímicos, e na durabilidade e desempenho dos materiais.

O modelo de caracterização utilizada foi desenvolvido pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO¹), que definiu o potencial de destruição de ozono de diferentes gases em quilogramas equivalentes de triclorofluormetano (CFC-11) por quilograma de emissão. O âmbito geográfico deste indicador é a escala global. A escala de tempo dos efeitos é infinita.

e) Potencial de formação de ozono troposférico – POCP

A oxidação fotoquímica corresponde à formação de compostos químicos reativos (principalmente ozono) pela ação de radiação ultravioleta (UV). Este problema é também conhecido como “smog de verão”. Atualmente, o ozono troposférico é um dos poluentes atmosféricos mais graves da Europa. Os níveis elevados de ozono causam graves problemas de saúde, mortes prematuras, redução da produtividade de culturas agrícolas, alterações na biodiversidade e danos materiais.

Os compostos químicos associados a este problema, como por exemplo, os óxidos de azoto (NO_x), monóxido de carbono (CO) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs) são emitidos para a atmosfera a partir de muitos processos naturais e antropogénicos. Na parte mais baixa da atmosfera da Terra, a troposfera, e sob a influência da radiação UV são formados foto-oxidantes através da oxidação fotoquímica de VOCs e CO na presença de NO_x. Estas reações levam à formação de ozono (O₃), nitrato de peroxiacetil (PAN), nitrato de peroxibenzoyl (PBN) e uma série de outras substâncias.

¹ Acrónimo da expressão da língua inglesa “World Meteorological Organisation”

Nos seres humanos, baixas concentrações de smog fotoquímico podem causar reduzida funcionalidade dos pulmões, constrição no peito, olhos, nariz e irritação da garganta. Em concentrações mais elevadas pode causar tosse e diminuição da capacidade de concentração. Em relação aos materiais, o ozono ataca a borracha natural, celulose, polímeros sintéticos, etc., e reduz o tempo de vida de muitos materiais (têxteis, pneus dos carros, etc.).

Este indicador expressa-se em quilogramas equivalentes de etileno (C_2H_4) por quilograma de emissão. Estas emissões têm um efeito que se mantém durante 5 dias e este mecanismo tem repercussões à escala local e continental

f) Potencial de eutrofização – EP

A eutrofização, também conhecida por nitrificação, inclui todos os impactes devidos a níveis excessivos de macronutrientes no ambiente causados pelas emissões de nutrientes para o ar, água e solo. Os nutrientes são normalmente adicionados ao solo através da fertilização para estimular o crescimento das plantas e produtos agrícolas. Quando esses nutrientes acabam em cursos naturais de água ou solos sensíveis, esta fertilização não intencional poderá resultar num excesso de plantas ou algas, que, por sua vez pode conduzir à falta de oxigénio e consequentemente à morte de espécies. Este problema ambiental está normalmente associado a emissões de azoto (N) e fósforo (P).

O potencial de eutrofização expressa-se em quilogramas equivalentes de fosfato (PO_4) por quilograma de emissão. A duração deste impacte ambiental é infinito e o mesmo tem repercussões à escala local e continental.

4.3.1.1.2. Cumulative Energy Demand

O Cumulative Energy Requirements Analysis (CERA) visa investigar o uso de energia em todo o ciclo de vida de um bem ou serviço, onde se inclui o consumo de energia direto e indireto devido ao uso de, por exemplo, matérias-primas ou materiais de construção. Este método foi desenvolvido no início dos anos setenta, após a primeira crise petrolífera (Boustead & Hancock, 1979; Pimentel 1973).

Segundo o Verein Deutscher Ingenieure (1997) os dados do Cumulative Energy Demand (CED) formam uma base de dados importante que apontam prioridades de economia de energia nas fases do ciclo de vida de uma construção. Esta base de dados é amplamente usada como um indicador de triagem para os impactes ambientais e os seus valores também podem ser usados para um estudo de análise de ciclo de vida. Os resultados desta base de dados são admissíveis e de fácil interpretação.

A análise de energia acumulada é um bom ponto de partida para o conceito de ciclo de vida. Esta análise não dispensa a colaboração de métodos de avaliação de impacte, como por exemplo o Ecoindicator 99 ou o *Ecological Scarcity*. O banco de dados da Ecoinvent possui informações detalhadas acerca dos fluxos entre o meio ambiente e o sistema em análise reais e, especialmente, sobre o processo específico de emissões e recursos utilizados. Kasser & Pöll

(1999) referem que o Cumulative Energy Demand só faz sentido combinado com outros métodos.

Seguidamente apresenta-se resumidamente as categorias de energia primária incorporada estudadas (Bragança & Mateus, 2011).

a) Energia renovável incorporada – ER

Este indicador não exprime um impacto ambiental negativo. Na maior parte das vezes, o mesmo serve para demonstrar a preocupação de um determinado produtor na utilização de fontes de energia renovável em detrimento de fontes não renováveis. Este indicador expressa-se em megajoules equivalentes (MJ) e inclui a energia fóssil e nuclear consumida (Bragança & Mateus, 2011).

b) Energia não renovável incorporada – ENR

Este indicador exprime o consumo de energia não renovável associado às fases do ciclo de vida dos produtos em estudo e desta forma representa a contribuição do produto para o esgotamento dos recursos energéticos não-renováveis. Este indicador expressa-se em megajoules equivalentes (MJ) e inclui a energia fóssil e nuclear consumida (Bragança & Mateus, 2011).

No Quadro 4.1 apresentam-se resumidamente as categorias de impacto ambiental com o método utilizado na sua quantificação e apresentam-se as unidades em que se expressam cada uma delas.

Quadro 4.1: Método LCA e unidades utilizados na quantificação de cada uma das categorias de impacto ambiental

Categorias de impacto ambiental	Acrónimo	Método LCA	Unidade
Potencial de diminuição das reservas de recursos abióticos	ADP	CML 2 baseline 2000	kg Sb eq
Potencial de acidificação	AP		kg CO ₂ eq
Potencial de aquecimento global ou efeito de estufa	GWP		kg CFC-11 eq
Potencial de destruição da camada de ozono estratosférico	ODP		kg SO ₂ eq
Potencial de formação de ozono troposférico	POCP	Cumulative Energy Demand	kg C ₂ H ₄ eq
Potencial de eutrofização	EP		kg PO ₄ eq
Energia renovável incorporada	ENR		MJ eq
Energia não renovável incorporada	ER		MJ eq

4.3.1.2. Parâmetros Funcionais

Os parâmetros funcionais podem ser quantificados com recurso a metodologias existentes, através das quais é possível prever as diferentes características funcionais de uma solução construtiva, ou então, através da utilização e processamento de bases de dados existentes com as características funcionais de soluções construtivas convencionalmente utilizadas (Mateus *et al*, 2006).

O conforto dos ocupantes é a principal exigência do ambiente interior. Existem diversos problemas ao nível do conforto devidos a níveis desadequados de temperatura e humidade relativa, condições de iluminação, níveis de ruído inaceitáveis, má qualidade do ar interior e condições ergonómicas adversas.

As condições do ambiente interior estão fortemente relacionadas com o comportamento energético de grande parte dos edifícios, uma vez que uma grande parte da energia consumida nos edifícios é usada para otimizar o ambiente interior, em especial as condições térmicas e de iluminação. Torna-se assim necessário, assegurar as condições de saúde e bem-estar (conforto) e em simultâneo garantir a sustentabilidade das construções (Silva, 2009).

Na realização deste trabalho os parâmetros funcionais em estudo na avaliação das soluções de reabilitação de fachadas e coberturas são:

- Consumo energético para aquecimento e arrefecimento ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$);
- Índice de isolamento a sons aéreos ($D_{2m,nT,W}$ ou $D_{nT,W}$).

4.3.1.2.1. Simulação do consumo energético

A simulação de edifícios pode ser definida como a introdução das características de um edifício num modelo, com um certo nível de abstração. Tendo em conta que um edifício é composto por milhares de variáveis, é necessário apenas implementar aquelas que são de maior representatividade para o comportamento do edifício que se pretende avaliar (Silva, 2009).

Atualmente as ferramentas de simulação são utilizadas de uma forma generalizada no setor dos edifícios. Através de uma simulação energética podem obter-se dados de previsão das transferências de energia e de radiação solar relevantes para o comportamento térmico, conforto interior e consumo de energia de um edifício.

A simulação detalhada do comportamento térmico de um edifício permite otimizar soluções, que podem contribuir significativamente para a redução do consumo de energia. Esta potencial redução resulta de um ou mais dos seguintes aspetos (Silva, 2009):

- Otimização da envolvente;
- Incorporação de sistemas solares passivos;
- Maior rigor no dimensionamento de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC);
- Incorporação de soluções de climatização e iluminação mais eficientes;

Para simular a realidade, utilizando ferramentas de simulação, é necessário executar três tarefas:

- Criação do modelo – representação esquemática do edifício;
- Simulação – introdução do modelo na ferramenta de simulação;
- Análise de resultados – análise de todos os resultados obtidos pela ferramenta de simulação, de forma a produzir os indicadores de desempenho que se pretende quantificar.

O DesignBuilder (DesignBuilder, 2012) é uma das muitas ferramentas informáticas existentes de simulação do comportamento térmico e energético. As predefinições desta ferramenta permitem que se atribuam aos modelos dados e características de construções, atividades e ocupações, sistemas de AVAC e iluminação. O utilizador poderá construir as suas próprias predefinições, consoante as necessidades de cada projeto. Tudo isto, combinado com a estrutura hierarquizada, permite que se defina e altere, as características do edifício, desde o nível mais geral do edifício ao nível mais detalhado. Por fim, os dados das simulações são apresentados sem necessidade de se recorrer a módulos externos. No entanto, esses dados podem sempre ser exportados, caso o utilizador tenha uma necessidade específica (Natural Works, 2010).

Esta é uma das ferramentas mais sofisticadas de simulação energética existente atualmente. Esta combina um motor gráfico, com o motor de cálculo EnergyPlus. Esta ferramenta é inovadora em termos de funcionamento do modelo 3D, possibilitando editar o modelo em tempo real e reproduzir renderizações, de forma a melhorar o controlo da simulação (Natural Works, 2010).

O DesignBuilder poderá ser utilizado tipicamente nas seguintes aplicações (Natural Works, 2010):

- Análise do desempenho energético dos edifícios;
- Avaliação das fachadas em termos visuais;
- Avaliação da ventilação natural;
- Modelos de iluminação natural,
- Dimensionamento dos equipamentos AVAC.

De acordo com os ficheiros climáticos para Portugal disponíveis na ferramenta DesignBuilder, definiu-se que a localização do modelo para a realização da simulação de cada um dos cenários de reabilitação seria o ficheiro denominado de Porto/Pedras Rubras.

Considerou-se que a ocupação média de 4 pessoas para uma área útil de 64m^2 , variando a ocupação em função do tipo de compartimento. O período de ocupação definido foi entre as 18h e as 9h, sendo o período de não ocupação o restante (9h às 18h). Estimou-se ainda um índice de actividade metabólica para o número de horas em que os ocupantes realizavam trabalho que envolvia andar e dormir, sendo que das 15h que os ocupantes passavam diariamente em casa, 7h envolviam trabalho e 8h descanso.

Em geral os edifícios residenciais portugueses não são climatizados e quando o são, são-no em geral apenas na estação de aquecimento, e durante os períodos de ocupação. Assim, as necessidades energéticas foram calculadas usando o sistema “*electricity from grid*” definido no DesignBuilder, sendo o sistema de controlo definido para manter a temperatura ambiente entre os 20°C e os 25°C , de acordo com o definido no RCCTE, para o período de ocupação.

No Quadro 4.2 apresenta-se detalhadamente os pressupostos considerados para a simulação energética ao edifício em estudo, no que concerne às informações de implantação, ocupação, iluminação, produção de água quente e climatização.

Quadro 4.2: Pressupostos considerados para realizar a simulação energética no DesignBuilder

Informações	- Localização do modelo: Porto/Pedras Rubras
	- Localização: Guimarães
	- Dados climáticos de simulação: PRT_PORTO_IWEC
Ocupação	- Densidade (ocupantes/m ²): 0,0625
	- Índice metabólico: Trabalho que envolvam andar (52,03%) Dormir (47,97%)
	- Perfil: 18:00h - 09:00h
Iluminação geral	- Perfil: 18:00h - 09:00h
	- Horário:
	Dias da semana: 07:00h - 09:00h & 18:00h-23:00h; Fins de semana: 09:00h - 23:00
Água quente	- Perfil: 07:00h - 09:00 & 18:00h - 23:00h
	- Horário:
	Dias da semana: 07:00h - 09:00h & 18:00h-23:00h; Fins de semana: 09:00h - 23:00
Aquecimento	- Ponto de ajuste da temperatura (°C): 20
	- Temperatura de retorno (°C): 18
	- Perfil: 18:00h - 09:00h
	- Horário:
	Dias de semana: 07:00h - 09:00h & 18:00h - 23:00h Fins de semana: 09:00h - 23:00h
	- Sistema:
Combustível: Eletricidade	
COP do Sistema de aquecimento : 1	
Controlo sazonal: apenas no inverno	
Arrefecimento	- Ponto de ajuste da temperatura (°C): 25
	- Temperatura de retorno (°C): 35
	- Perfil: 18:00h - 23:00h
	- Horário:
	Dias de semana e fins de semana: 18:00h - 23:00h
	- Sistema:
Combustível: Eletricidade	
COP do Sistema de arrefecimento: 3	
Controlo sazonal: apenas no verão	

4.3.1.2.2. Índice de isolamento a sons aéreos ($D_{2m,nT,W}$ e $D_{nT,W}$)

Da energia sonora que incide num elemento de separação, uma parte é dissipada sob a forma de calor e a restante é transmitida pela parede a outros locais. A transmissão sonora, por via área, entre dois recintos é um fenómeno complexo que pode envolver simultaneamente transmissões diretas – quando as transmissões ocorrem através do elemento de separação comum aos dois recintos, e transmissões indiretas ou marginais – quando as transmissões tomam lugar através dos elementos construtivos adjacentes.

Neste trabalho, como se pretende avaliar unicamente o comportamento acústico das soluções construtivas na zona corrente, serão ignoradas as transmissões indiretas. Mesmo considerando apenas a transmissão por via direta, o fenómeno de transmissão não é simples, pois envolve uma série de fatores, entre os quais se destacam (Mateus, 2004):

- Frequência do som incidente no elemento separador;
- Massa do elemento;
- Ângulo de incidência das ondas sonoras;
- Porosidade do elemento;
- Rigidez do elemento.

Existem alguns métodos que permitem estimar numericamente o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea. Neste estudo recorreu-se ao Modelo Misto proposto por Meisser (Meisser, 1973) e cuja adequação às soluções construtivas portuguesas foi estudada por Diogo Mateus e António Tadeu (Mateus *et al*, 1999).

De seguida apresenta-se de forma resumida o método utilizado para estimar o índice de isolamento a sons aéreos.

b.1) Aplicação da lei da massa

O índice de redução sonora de um elemento de construção é tanto maior quanto maior for a sua massa. Esta relação é conhecida pela Lei da Massa. Num elemento hipotético, onde se despreza a rigidez e o amortecimento, é possível estabelecer, através de um modelo inercial, uma lei da massa teórica que se traduz num acréscimo de isolamento sonoro do elemento de separação de 6dB por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência do som, no caso de elementos de construção simples. Segundo Meisser (1973) para os elementos duplos e triplos, é possível considerar-se uma lei teórica da massa com inclinação média de 8dB.

Na previsão do índice de isolamento acústico, Meisser (1973) considera ainda, uma lei experimental da massa, traduzida nos elementos simples, duplos e triplos, por um acréscimo de 4dB, 6dB e 10dB, respetivamente, por cada duplicação da massa ou duplicação da frequência.

Neste modelo de estimação, para o traçado da curva de isolamento é considerada a lei experimental da massa, mas com um posterior ajustamento ao modelo analítico, considerando a lei teórica da massa e as quebras de isolamento nas frequências próprias de vibração transversal por flexão e por efeito de coincidência.

A partir da análise experimental, verificou-se que o índice de isolamento acústico, na frequência de 500Hz e para uma massa de 100kg/m² era de 40dB. Assim, a lei experimental da massa, para um som de 500Hz (m em kg/m²), pode ser expressa através da equação [4.2].

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 13,3 \text{ Log } (m) + 13,4 \text{ dB} \quad [4.2]$$

Em elementos de separação pesados, cuja massa é igual ou superior a 200kg/m², da análise experimental verifica-se que é possível considerar para a lei da massa uma maior inclinação, pelo que este comportamento se aproxima à equação [4.3].

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} \quad [4.3]$$

No caso de elementos duplos, o índice de isolamento acústico para os 500Hz é obtido através da lei experimental da massa, resultante das equações [4.2] ou [4.3], acrescentando-lhe a diferença de isolamento entre elementos simples e duplos com a mesma massa superficial total (Dif.), como se pode observar na equação [4.4].

Nas soluções correntes com caixas-de-ar com largura na gama dos 0,02 a 0,04m, esta diferença é próxima dos 4dB para a frequência dos 500Hz. Quando as caixas-de-ar

apresentam largura superior a 0,04m a diferença é muito maior, podendo atingir os 9dB no caso de soluções com painéis cujas massas não são muito diferentes.

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \quad [4.4]$$

b.2) Frequência de ressonância do conjunto

A frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos através da equação [4.5].

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad [4.5]$$

Com:

- d espessura da caixa-de-ar (m).
- m_1, m_2 massa dos panos constituintes da parede de (kg/m^2) .

A frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos triplos através da equação [4.6].

$$(m_1 m_2 m_3)(f_{\text{ress}}^2)^2 - [K_1 m_3(m_1 + m_2) + K_2 m_1(m_2 + m_3)]f_{\text{ress}}^2 + [K_1 K_2(m_1 + m_2 + m_3)] = 0 \quad [4.6]$$

Em que:

- $K_1 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_1}$
- $K_2 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_2}$

Quando o valor da frequência de ressonância se situa fora da zona audível, isto é, geralmente abaixo dos 100Hz, é desprezada a perturbação que ocorre na curva de isolamento sonoro na frequência de ressonância do conjunto. Quando a frequência de ressonância é superior a 100Hz deve-se corrigir o elemento construtivo, aumentando a largura da caixa-de-ar e/ou a massa de cada um dos panos.

b.3) Frequências de ressonância da caixa-de-ar

As reflexões múltiplas das ondas sonoras que se verificam no interior da caixa-de-ar são responsáveis por quebras na curva de isolamento sonoro.

A frequência de ressonância da caixa-de-ar pode ser desprezada sempre que se utilize um material absorvente no interior. É importante ter em conta este fenómeno no caso de elementos duplos cuja caixa-de-ar não apresente um material absorvente como, por exemplo, nos vidros duplos.

b.4) Frequência crítica

As quebras de isolamento acústico a considerar na zona da frequência crítica dependem do amortecimento interno do material que constitui o elemento de separação. A quebra por efeito de coincidência correspondente a cada material com espessura unitária, assim como a frequência em que ocorre essa quebra – frequência crítica – encontram-se apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3: Frequências críticas e quebra de isolamento por efeito de coincidência de diversos materiais para paredes de 1cm de espessura (Mateus *et al*, 1999)

Material	Frequência crítica (Hz) para a espessura de 1 cm	Quebra de isolamento por efeito de coincidência (dB)
Aço	1 000	10
Aglomerado fibras de madeira/cimento	6 000	8
Alumínio	1 300	10
Betão de inertes correntes	1 800	8
Betão de escórias	2 000	8
Blocos de betão magro	2 100	8
Betão de argila expandida	1 900	5-6
Borracha	85 000	4
Gesso	4 000	7
Chumbo	8 000	5
Cortiça	18 000	4
Madeira	6 000 a 18 000	6
Poliestireno expandido	14 000	5
Tijolo furado	2 000	9
Tijolo maciço	2 500 a 5 000	9
Vidro	1 200	10

O valor da frequência crítica é calculado através da equação [4.7].

$$f_c = \frac{\text{frequência crítica para uma espessura de 1cm de material}}{\text{espessura do material em cm}} \quad [4.7]$$

b.5) Índice de redução sonora

O valor do índice de redução sonora ponderado, R_w , deverá ser obtido através da comparação das curvas estimadas descritas anteriormente ($f - R$), com uma curva convencional de referência.

Segundo a Norma ISO 717-1 na comparação das duas curvas deve ser satisfeita a seguinte condição: o somatório dos desvios desfavoráveis deve ser inferior a 32dB e ser o mais próximo possível de 32dB, para gama estimada em terços de oitava e inferior a 10dB e ser o mais próximo possível de 10dB para gama estimada em oitavas. Os valores de R devem ser incrementados em intervalos de 1dB. O desvio é desfavorável para uma determinada banda de frequência quando o valor da medição é inferior ao de referência. Conseguindo este ajustamento, o índice de redução sonora, ponderado, R_w , é dado pelo valor da ordenada da curva de referência para a frequência de 500Hz.

Um outro aspecto a considerar no cálculo do índice de redução sonora ponderado (R_w), do índice de isolamento sonoro aos sons de condução aérea, normalizado estimado ($D_{n,w}$) ou do índice de isolamento sonoro aos sons de condução aérea, padronizado estimado ($D_{nT,w}$) são as transmissões marginais.

A necessidade de contabilizar as transmissões marginais na estimativa prende-se com o facto de estas poderem ser significativas, nomeadamente quando os elementos periféricos poderem constituir áreas de menor isolamento acústico que o elemento em estudo.

b.6) Quantificação da transmissão marginal

Se designar a influência da transmissão marginal pela sigla ΔTM , então a sua influência no valor do índice de redução sonora ponderado (R_w) será obtido através da equação [4.8]

$$R'_w = R_w - \Delta TM \quad [4.8]$$

Onde:

- R'_w – índice de redução sonora ponderado aparente (dB);
- R_w – índice de redução sonora ponderado (dB);
- ΔTM – factor de correcção relativo à influência da transmissão marginal (dB).

Ainda que de forma simplificada, podem-se definir alguns valores para os fatores de correcção relativos à influência da transmissão marginal (Patrício 2003), admitindo que as soluções construtivas do elemento de separação entre os espaços e dos elementos adjacentes são da mesma natureza sendo, portanto, possível assumir que o isolamento sonoro será tanto maior quanto mais elevada for a massa por unidade de superfície (kg/m^2) dos elementos:

- Se a massa superficial do elemento de separação for semelhante às dos elementos adjacentes, a transmissão que ocorre por via marginal (W_i) é equivalente à direta (W_d), podendo-se assumir um valor de $\Delta TM = 3$;
- Se a massa superficial do elemento de separação for muito inferior às dos elementos adjacentes, a propagação da energia sonora ocorre fundamentalmente pelo elemento de separação (W_d), podendo-se assumir um valor de $\Delta TM = 0$;
- Quando a massa superficial do elemento de separação é muito superior às dos elementos adjacentes então a propagação da energia sonora dar-se-á sobretudo por via marginal (W_i); neste caso, o valor de ΔTM pode variar de 3dB a um máximo da ordem de 10dB para casos particulares, sendo prudente a consideração de 5dB para as situações e soluções construtivas típicas em edifícios correntes.

b.7) Relação entre redução sonora aparente e isolamento sonoro normalizado ou padronizado

Para a previsão do desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea em edifícios é fundamental relacionar o parâmetro que é obtido em situação de projeto (R' ou R'_w) com o índice utilizado como exigência regulamentar (no caso Português, o índice $D_{nT,w}$), equação [4.9].

$$D_{nT,W} = R'_W + 10 \log \left(\frac{0,16 V}{T_0 S} \right) \quad [4.9]$$

Onde:

- $D_{nT, W}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado (dB);
- R'_W – índice de redução sonora ponderado aparente (dB)
- V – volume do compartimento receptor (m^3)
- T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a 0,5 s no caso de edifícios residenciais e situações análogas
- S – área do elemento construtivo (m^2)

O efeito da transmissão marginal, no caso do isolamento a sons aéreos provenientes do exterior é, para sistemas construtivos correntes, normalmente inferior ao que se verifica entre dois espaços interiores. Neste caso a EN 12354-3 aconselha a que se considere um valor $\Delta TM=2dB$ para a quantificação do índice R'_W a partir do índice R_W .

No caso de fachadas, a equação [4.9] deve ser afetada de um fator de correção devido à forma da mesma, ΔL_{fs} , tal como apresenta na equação [4.10]. Os valores deste fator para diversas situações de referência são definidos na EN 12354-3, em função da absorção média da superfície de reflexão exterior, e da altura da linha visível entre a fonte de ruído e o espaço interior em estudo.

$$D_{2m,nT,W} = R'_W + 10 \log \left(\frac{0,16 V}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \quad [4.10]$$

Onde:

- $D_{2m,nT, W}$ – índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado (dB);
- R'_W – índice de redução sonora ponderado aparente (dB)
- V – volume do compartimento recetor (m^3)
- T_0 – tempo de reverberação de referência (s), tomando um valor igual a 0,5 s no caso de edifícios residenciais e situações análogas
- S – área do elemento construtivo (m^2)
- ΔL_{fs} – fator de correção devido à forma da fachada (dB)

4.3.1.3. Parâmetros Económicos

A avaliação dos custos de ciclo de vida de um edifício é mais direta, consensual e objetiva quando comparada com a avaliação do desempenho ambiental.

Atualmente existe uma elevada quantidade de metodologias LCC¹ e várias bases de dados publicadas. Em Portugal, destaca-se a publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil intitulada “Informação Sobre Custos na Construção” (Bragança e Mateus, 2011). Esta publicação apresenta dados quantitativos acerca dos custos de construção, incluindo lucros, associados a diversas soluções construtivas e é actualizada periodicamente, sempre que as flutuações dos preços no mercado sejam superiores a 10%.

¹ Acrónimo da expressão inglesa *Life Cycle Cost*

A avaliação dos custos de ciclo de vida é um método que soma os custos de investimento associados ao período do ciclo de vida em estudo. A soma total é geralmente apresentada sobre duas formas: valor atual líquido ou custo anual. Este método é utilizado para comparar soluções construtivas ou edifícios que satisfaçam o mesmo nível de desempenho.

Estas comparações permitem verificar qual a solução que apresenta custos mais baixos durante o período em estudo e, por conseguinte, a solução de melhor desempenho económico.

O método de avaliação dos custos de ciclo de vida pode incluir o investimento inicial, os custos de utilização, substituição, manutenção e reparação e os custos de demolição e transporte a vazadouro. O valor residual, associado ao potencial de reutilização e reciclagem, geralmente não é considerado.

Na realização deste trabalho os parâmetros económicos serão obtidos através da base de dados “Gerador de Preços” da ferramenta informática CYPECAD (CYPE, 2011).

4.3.2. Normalização dos parâmetros

A normalização dos parâmetros tem como objetivo evitar os efeitos de escala na agregação dos parâmetros de cada indicador. Na normalização é utilizada a fórmula de Diaz-Balteiro equação [4.10].

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - P_{*i}}{P_i^* - P_{*i}} \forall i \quad [4.10]$$

Em que P_i representa o resultado da quantificação do parâmetro i . P_i^* e P_{*i} correspondem ao melhor e ao pior resultado do parâmetro de sustentabilidade i .

O método de normalização utilizada torna os parâmetros considerados na avaliação da sustentabilidade adimensionais e converte-os numa escala compreendida entre 0, o pior valor, e 1, o melhor valor.

4.3.3. Agregação dos Parâmetros

A apresentação do desempenho de uma solução através da listagem dos resultados obtidos ao nível de todos os parâmetros considerados, isto é, ambientais, funcionais e económicos, complica a compreensão do desempenho global da solução. Para solucionar esta questão, são combinados, dentro de cada dimensão, os diversos parâmetros, em função do peso (importância) que é atribuído a cada um no cumprimento dos requisitos de projeto.

O desempenho parcial da solução a nível de cada dimensão, I_j , é calculado de acordo com o método de agregação apresentado na equação [4.11] (Mateus *et al*, 2006).

$$\bar{I}_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \bar{P}_i \quad [4.11]$$

Nesta equação, I_j corresponde à média ponderada de todos os parâmetros normalizados \bar{P}_i pertencentes ao indicador j e w_i representa o peso relativo do parâmetro i . É de realçar que a soma de todos os pesos deve ser igual a 1.

As equações [4.12], [4.13] e [4.14] apresentam o modo como se agregam os parâmetros dentro de cada dimensão para se determinar o desempenho ao nível de cada dimensão do desenvolvimento sustentável (Mateus *et al*, 2006).

$$\text{Desempenho Ambiental} \quad \bar{I}_A = \sum_{i=1}^n w_{A_i} \cdot \bar{P}_{A_i} \quad [4.12]$$

$$\text{Desempenho Funcional} \quad \bar{I}_F = \sum_{i=1}^n w_{F_i} \cdot \bar{P}_{F_i} \quad [4.13]$$

$$\text{Desempenho Económico} \quad \bar{I}_E = \bar{P}_E \quad [4.14]$$

O peso de cada parâmetro na avaliação ao nível de cada dimensão, não é consensual, pois varia de metodologia para metodologia de avaliação e reconhecimento da construção sustentável.

No que concerne aos parâmetros ambientais, já existem alguns estudos, como por exemplo, o United States Environmental Protection Agency (EPA), que apresenta uma lista de doze parâmetros ambientais, nos quais foi analisada a importância de cada um, em função dos efeitos nocivos para o ambiente (EPA, 2000). Os resultados obtidos através desse estudo encontram-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4: Peso de cada parâmetro na avaliação do desempenho ambiental (EPA & SBA, 2000)

Parâmetro	Peso (%)
Aquecimento Global	24,0
Acidificação	8,0
Eutrofização	8,0
Utilização de combustíveis fósseis	8,0
Qualidade do ar interior	16,0
Alteração dos habitats	24,0
Utilização de água	4,0
Emissão de gases poluentes	8,0
Criação de “Smog”	6,0
Toxicidade para os ecossistemas	11,0
Toxicidade para o ser humano	11,0
Destruição da camada de ozono	5,0

4.3.4. Determinação da Nota Sustentável

A fase posterior à agregação de cada um dos parâmetros, ao nível de cada dimensão da sustentabilidade, consiste na determinação do desempenho global da solução construtiva. A nota sustentável (NS) é determinada através da equação [4.15] (Mateus *et al*, 2006).

$$NS = w_A \cdot I_A + w_F \cdot I_F + w_E \cdot I_E \quad [4.15]$$

Na equação [4.13], NS é o resultado da ponderação de cada dimensão I_j com o respetivo peso (W_j), na avaliação da sustentabilidade. A soma dos pesos atribuídos aos três indicadores tem de ser igual a 1, de modo a se obter uma nota sustentável compreendida entre 0 e 1 (Mateus *et al*, 2006).

Como através da construção sustentável se pretende principalmente uma maior compatibilidade entre os ambientes construído e natural, sem que com isso se comprometa em primeiro lugar a funcionalidade e por fim a viabilidade económica do projeto, considera-se nesta avaliação (Mateus *et al*, 2006):

- Peso do indicador ambiental: $W_A = 0,3$
- Peso do indicador funcional: $W_F = 0,5$
- Peso do indicador económico: $W_E = 0,2$

Calculados os índices de comparação é possível avaliar, ao nível de cada parâmetro, se a solução construtiva em estudo é melhor ou pior do que a solução construtiva de referência.

4.3.5. Representação do Perfil Sustentável

Esta fase consiste em representar graficamente o valor normalizado dos parâmetros analisados. Deste modo, é possível observar de uma forma clara as diferenças que existem entre o desempenho de cada solução ao nível de cada parâmetro.

A representação gráfica é elaborada através de um gráfico tipo radar, também conhecido por *Diagrama de Amoêba*, o qual apresenta um número de raios igual ao número de parâmetros em análise. Quanto mais próximo do centro se encontrar uma solução, menor será a sua sustentabilidade. Para que se observe facilmente as diferenças em cada solução e a solução de referência, o perfil sustentável da solução de referência é traçado sobre o perfil de cada solução (Mateus *et al*, 2006).

4.4. Otimização das soluções ao caso de estudo

Após identificar o melhor cenário de reabilitação, vai-se proceder à otimização da espessura de isolamento térmico de modo a determinar a solução ideal de reabilitação a implementar no edifício em estudo (fachada e cobertura).

Este estudo será conduzido através da análise do período de retorno de investimento, tendo em atenção os custos de investimento inicial da operação de reabilitação (incluindo o custo das diversas variantes de isolamento térmico) e os custos para climatização e AQS do edifício existente.

Para alcançar os resultados pretendidos serão analisados os seguintes pressupostos:

- O comportamento relativamente aos consumos energéticos em kWh/ano para aumento da espessura de material de isolamento térmico na fachada e cobertura;
- Os custos económicos de reabilitação para a implementação das devidas soluções com as diversas espessuras de material de isolante térmico;

- Os custos económicos associados aos consumos de energia dos cenários de reabilitação de fachadas e coberturas para os distintos valores de espessura de material de isolamento térmico;
- O tempo de retorno de investimento, em anos, para os custos económicos de reabilitação e consumo energético para as diversas situações de aumento de espessuras de isolamento térmico dos cenários de reabilitação.

Através da utilização do programa informático Design Builder, ir-se-á simular o consumo de energia total, em kWh/ano, para cada uma das soluções de reabilitação para as diferentes espessuras de material de isolamento térmico a implementar no edifício.

Com os valores dos consumos energéticos em kWh converteram-se os mesmos em custo económico de acordo com as tarifas energéticas em vigor. Apesar do preço do tarifário incluir o preço da potência instalada e ainda o preço de energia que varia com o seu consumo, considerou-se o valor de energia de 0,1365€/kWh (EDP, 2012).

Definindo um período de retorno de investimento de oito anos, vai-se verificar em que ano os custos acumulados de energia da solução existente se igualam ao somatório do custo de reabilitação com os custos acumulados de consumos energético das diferentes soluções.

O valor de energia para o primeiro ano, corresponde à soma do custo de investimento (custo de reabilitação) com o custo de energia anual obtido através da simulação energética (equação [4.16]).

$$C_1 = C_{Reabilitação} + C_{energia} \quad [4.16]$$

Para um determinado período de t anos determinou-se variação dos custos acumulados de investimento e energia através da equação [4.17].

$$C_t = Custo_{t-1} + (C_{energia} \times (1 + a)^t) \quad [4.17]$$

Em que,

- t corresponde ao ano que queremos determinar o custo;
- C_t corresponde ao custo no ano t;
- C_{t-1} equivale ao custo no ano t-1;
- $C_{energia}$ corresponde ao custo anual de energia da solução;
- a equivale à taxa de variação da energia, com valor de 4%.

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE COMPARATIVA DA SUSTENTABILIDADE DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

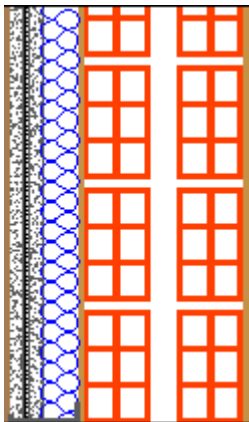
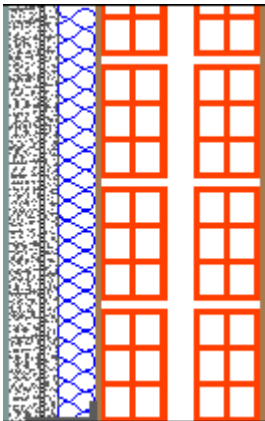
5.1. Enquadramento

Neste capítulo apresenta-se a uma análise comparativa entre os vários cenários de reabilitação propostos ao nível das fachadas e coberturas. Este estudo visa avaliar a sustentabilidade de cada solução de reabilitação, através da sua comparação com a solução mais corrente nos edifícios em Portugal.

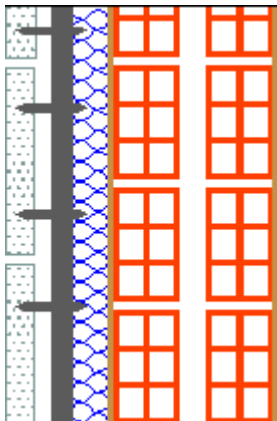
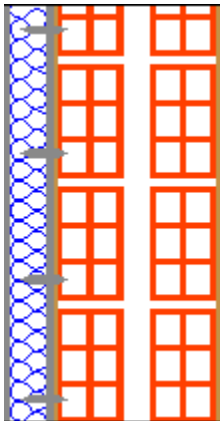
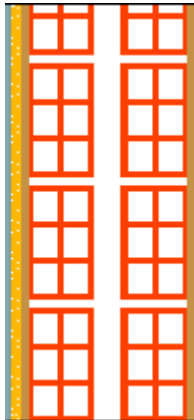
5.2. Avaliação Relativa da Sustentabilidade dos cenários de reabilitação de fachadas

Neste trabalho serão analisadas oito soluções de reabilitação de fachadas, cinco soluções pelo exterior, duas pelo interior e uma por injeção de isolamento na caixa-de-ar. No Quadro 5.1. apresentam-se detalhadamente as descrições de cada uma das soluções em estudo.

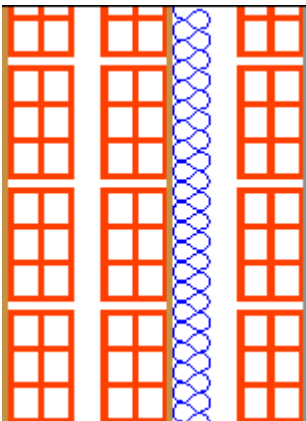
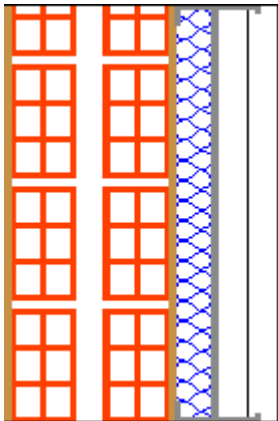
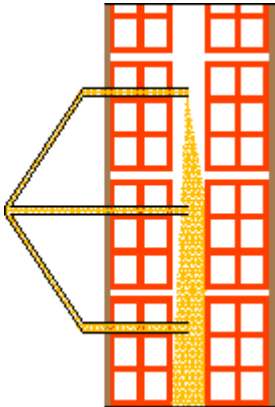
Quadro 5.1: Descrição das oito soluções de reabilitação de fachadas

ID da solução	Corte esquemático	Descrição
Fach.1		<p>Sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante</p> <p>Nesta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura. Nos revestimentos considerou-se argamassas não-tradicionais, armadas com uma rede de fibra de vidro para camada base e para o revestimento de acabamento argamassas não-tradicionais, com aplicação de tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão aplicada sobre o paramento exterior em argamassa</p>
Fach.2		<p>Sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante</p> <p>Na presente solução considerou-se isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura. No que respeita aos revestimentos ligantes considerou-se argamassas não-tradicionais, armadas com uma rede metálica em aço-galvanizado. A camada de revestimento delgado é um reboco não-tradicional e o acabamento corresponde à aplicação de uma tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão sobre o paramento.</p>

Quadro 5.1 (cont.): Descrição das oito soluções de reabilitação de fachadas

ID da solução	Corte esquemático	Descrição
Fach.3	 <p>Ext. Int.</p>	<p>Revestimentos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia</p> <p>Nesta solução considerou-se uma camada de isolamento térmico com placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura; uma estrutura de suporte em aço-inoxidável com os perfis horizontais de dimensão 0,50x0,125m e verticais com 0,40x0,70m, ambos com espessura de 0,002m; e um revestimento exterior em placas cerâmicas com dimensão de 0,60x0,30m com espessura de 0,03m</p>
Fach.4	 <p>Ext. Int.</p>	<p>Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados diretamente à parede</p> <p>Na presente solução considerou-se a aplicação de um painel pré-fabricado de poliestireno expandido moldado com 0,03m de espessura e de um revestimento liso em chapa de aço-galvanizado, de 0,004m de espessura</p>
Fach.5	 <p>Ext. Int.</p>	<p>Rebocos Isolantes</p> <p>Na referida solução considerou-se a aplicação de uma argamassa com grânulos de isolante térmico com diâmetro reduzido e ainda a aplicação de tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão sobre a argamassa</p>

Quadro 5.1 (cont.): Descrição das oito soluções de reabilitação de fachadas

ID da solução	Corte esquemático	Descrição
Fach.6		<p>Execução de uma contrafachada pelo interior em alvenaria</p> <p>Nesta solução considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de 0,03m em poliestireno expandido extrudido; tijolo furado de 11 com dimensão de 0,30x0,20m e espessura de 0,11m; argamassas tradicionais para assentamento e revestimento, e aplicação de tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão sobre o revestimento</p>
Fach.7		<p>Execução de uma contrafachada pelo interior em gesso</p> <p>Para a execução da contrafachada em gesso considerou-se as placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido expandido com 0,03m de espessura; estrutura de suporte em alumínio com os perfis horizontais e verticais de dimensão 0,03x0,08m e espessura de 0,0008m, painéis de gesso cartonado com 0,0125m de espessura e ainda uma camada de reboco tradicional com espessura de 0,015m com aplicação de tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão sobre a mesma</p>
Fach.8		<p>Injeção de isolamento na caixa-de-ar de paredes dupla</p> <p>Nesta solução considerou-se o preenchimento de uma caixa-de-ar com 0,03m de espessura com a injeção de espuma de Ureia-formaldeído</p>

Tendo em consideração a importância do comportamento térmico, relativamente às restantes exigências funcionais dos elementos da envolvente vertical, as soluções de reabilitação em análise foram definidas de modo a que os seus coeficientes de transmissão térmica fossem, no mínimo o mais semelhante possível.

Como solução de reabilitação de referência adotou-se a solução de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior, com revestimento delgado aplicado sobre o isolante (Fach.1). Esta consideração deveu-se ao facto desta ser a solução convencionalmente aplicada na reabilitação da envolvente vertical exterior de edifícios em Portugal.

Nesta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno expandido extrudido com 0,03m de espessura. Nos revestimentos considerou-se argamassas não-tradicionais, armadas com uma rede de fibra de vidro para camada base e para o revestimento de acabamento argamassas não-tradicionais, com aplicação de tinta com rendimento de 13,00m²/l/demão aplicada sobre o paramento exterior em argamassa.

A espessura do isolante térmico de cada uma das soluções foi definida tendo por base o valor de referência do coeficiente de transmissão térmica ($U=0,45\text{W/m}^2\text{°C}$) para elementos exteriores verticais em zona corrente (zonas opacas) de edifícios situados na zona climática de inverno I2, de acordo com o RCCTE. A espessura de isolamento de todas as soluções foi definida de modo a: respeitar os requisitos do RCCTE para a zona climática considerada; utilizar as espessuras de material isolante disponíveis no mercado; que todas as soluções tivessem um coeficiente global de transmissão térmica (U) semelhante ao da solução referência. Desta forma, todas as soluções apresentam um U de aproximadamente $0,44\text{W/m}^2\text{°C}$.

5.2.1. Quantificação dos Parâmetros

a) Parâmetros ambientais

Antes de se proceder à quantificação dos indicadores ambientais através da ferramenta SimaPro, procedeu-se à quantificação dos diferentes materiais utilizados na materialização das soluções construtivas, estando o resultando apresentado no Quadro 5.2. As quantidades obtidas foram posteriormente introduzidas no SimaPro, apresentando-se no Quadro 5.3 os resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais, utilizando os métodos LCA apresentados no capítulo anterior.

Quadro 5.2: Materiais utilizados em cada solução de reabilitação e respetivas quantidades

Materiais	Fach.1 (kg/m ²)	Fach.2 (kg/m ²)	Fach.3 (kg/m ²)	Fach.4 (kg/m ²)	Fach.5 (kg/m ²)	Fach.6 (kg/m ²)	Fach.7 (kg/m ²)	Fach.8 (kg/m ²)
Aço galvanizado	-	-	-	31,20	-	-	-	-
Aço inoxidável	-	-	2,00	-	-	-	-	-
Alumínio	0,40	-	-	-	-	-	0,69	-
Espuma de ureia-formaldeído	-	-	-	-	-	-	-	1,25
Placas cerâmicas	-	-	51,00	-	-	-	-	-
Painéis de gesso cartonado	-	-	-	-	-	-	10,94	-
Poliestireno expandido	0,98	0,98	0,98	0,98	-	0,98	0,98	-
Argamassa isolante	-	-	-	-	6,00	-	-	-

Quadro 5.2 (cont.): Materiais utilizados em cada solução de reabilitação e respectivas quantidades

Materiais	Fach.1 (kg/m ²)	Fach.2 (kg/m ²)	Fach.3 (kg/m ²)	Fach.4 (kg/m ²)	Fach.5 (kg/m ²)	Fach.6 (kg/m ²)	Fach.7 (kg/m ²)	Fach.8 (kg/m ²)
Reboco não tradicional	120,75	94,50	-	-	-	-	-	-
Reboco tradicional	-	-	-	-	-	89,75	28,50	-
Rede de fibra de vidro	0,00144	-	-	-	-	-	-	-
Rede metálica	-	0,00030	-	-	-	-	-	-
Tijolo cerâmico furado	-	-	-	-	-	61,44	-	-
Tinta	0,71	0,71	-	0,71	0,71	0,71	0,71	-

Quadro 5.3: Resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais

Soluções	Categorias de impacto ambiental						Energia incorporada	
	ADP (kg Sb eq)	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	AP (kg SO ₂ eq)	POCP (kg C ₂ H ₄ eq)	EP (kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Fach.1	1,57E-01	3,41E+01	1,98E-06	1,01E-01	9,92E-03	1,64E-02	3,77E+02	1,74E+01
Fach.2	1,08E-01	2,37E+01	1,09E-06	2,58E-01	8,29E-03	9,66E-03	2,59E+02	1,41E+01
Fach.3	5,99E-01	7,65E+01	7,78E-06	3,55E-01	2,50E-02	4,35E-02	1,37E+03	2,03E+01
Fach.4	5,26E-01	5,17E+01	2,50E-06	2,67E-01	3,49E-02	5,17E-02	9,86E+02	7,18E+01
Fach.5	3,80E-02	6,26E+00	4,04E-07	2,37E-02	2,72E-03	4,36E-03	8,66E+01	3,24E+00
Fach.6	2,11E-01	4,10E+01	2,66E-06	1,23E-01	1,21E-02	1,87E-02	4,90E+02	2,72E+01
Fach.7	1,61E-01	2,65E+01	1,47E-06	1,04E-01	1,42E-02	1,38E-02	3,79E+02	7,99E+00
Fach.8	4,13E-02	3,94E+00	4,85E-07	1,68E-02	2,10E-03	3,36E-03	8,90E+01	6,73E-01

No Anexo I.1. encontra-se organizada a Base de Dados de LCA desenvolvida neste estudo, apresentando detalhadamente a quantificação das categorias de impacto ambiental de cada um dos materiais constituintes das soluções de reabilitação de fachadas analisadas.

b) *Parâmetros Funcionais*

A quantificação dos parâmetros funcionais das oito soluções de reabilitação de fachadas foi realizada de acordo com as metodologias apresentadas no capítulo anterior. Apresentam-se no Quadro 5.4 os resultados obtidos na quantificação dos indicadores funcionais (consumo energético e índice de isolamento a sons aéreos e de percussão).

Quadro 5.4: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros funcionais

Soluções	Consumo energético (kWh/m ² .ano)	D_{2m,nT,w} (dB)
Fach.1	84,79	42
Fach.2	84,69	42
Fach.3	65,61	43
Fach.4	85,96	43
Fach.5	109,98	41
Fach.6	85,20	42
Fach.7	85,88	42
Fach.8	105,72	41

No Anexo II.1. encontra-se os cálculos do índice de isolamento a sons aéreos para as oito soluções de reabilitação de fachadas.

c) *Parâmetros Económicos*

O Quadro 5.5 apresenta os resultados dos parâmetros económicos obtidos através da base de dados “Gerador de Preços” da ferramenta informática CYPECAD (CYPE, 2011), para os cenários de reabilitação de fachadas em estudo.

Quadro 5.5: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros económicos

Soluções	Custo (€/m ²)
Fach.1	41,28
Fach.2	42,78
Fach.3	107,92
Fach.4	38,35
Fach.5	13,29
Fach.6	18,75
Fach.7	44,39
Fach.8	6,75

No Anexo III.1. encontra-se a Base de Dados de Custos Económicos, apresentando detalhadamente as análises económicas das soluções de reabilitação de fachadas.

5.2.2. Normalização dos Parâmetros

Os resultados obtidos para a normalização dos parâmetros em análise, encontram-se apresentados no Quadro 5.6. A normalização dos oito cenários de reabilitação de fachadas foi efetuada pela fórmula de Diaz-Balteiro, equação [4.10].

Quadro 5.6: Valores normalizadores dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos

Solução	Ambientais				Funcionais		Económicos	
	FFDP	GWP	AP	EP	POCP	kWh/m ²	D _{2m,nT,w}	LCC
Fach.1	0,76	0,58	0,75	0,64	0,76	0,57	0,50	0,66
Fach.2	0,87	0,73	0,29	0,84	0,81	0,57	0,50	0,64
Fach.3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	1,00	1,00	0,00
Fach.4	0,30	0,34	0,26	0,67	0,00	0,54	1,00	0,69
Fach.5	1,00	0,97	0,98	0,97	0,98	0,00	0,00	0,94
Fach.6	0,69	0,49	0,68	0,62	0,70	0,56	0,50	0,88
Fach.7	0,77	0,69	0,74	0,74	0,63	0,54	0,50	0,63
Fach.8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,10	0,00	1,00

5.2.3. Agregação dos Parâmetros

No Quadro 5.7 encontram-se apresentados, para cada uma das soluções construtivas os resultados obtidos na agregação dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos.

Estes valores foram obtidos através das equações [4.12], [4.13] e [4.14] que apresentam o modo de agregação dos parâmetros dentro de cada um dos indicadores.

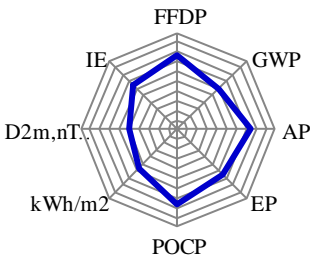
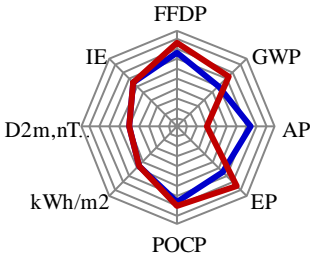
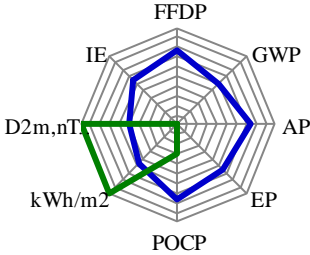
Quadro 5.7: Desempenhos ambientais (IA), funcionais (IF) e económicos (IE) para cada um dos cenários de reabilitação

Solução	IA	IF	IE
Fach.1	0,67	0,55	0,66
Fach.2	0,72	0,55	0,64
Fach.3	0,05	1,00	0,00
Fach.4	0,31	0,66	0,69
Fach.5	0,98	0,00	0,94
Fach.6	0,59	0,54	0,88
Fach.7	0,70	0,53	0,63
Fach.8	1,00	0,07	1,00

5.2.4. Perfis Sustentáveis

Os perfis sustentáveis para cada um dos cenários de reabilitação de fachadas encontram-se apresentados no Quadro 5.8. As notas sustentáveis foram determinadas através da equação [4.15], e os perfis sustentáveis foram desenvolvidos tal como descrito na secção 4.1.5.

Quadro 5.8: Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de fachadas

Solução	NS	Perfil sustentável
Fach.1	0,61	
Fach.2	0,62	
Fach.3	0,51	

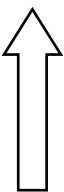
Quadro 5.8 (cont.): Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de fachadas

Solução	NS	Perfil sustentável
Fach.4	0,56	
Fach.5	0,48	
Fach.6	0,63	
Fach.7	0,60	
Fach.8	0,54	

Analisando os resultados obtidos através da aplicação da metodologia MARS-SC aos oito cenários de reabilitação para fachadas, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução de reabilitação mais sustentável é a solução Fach.6 enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução Fach.5. No Quadro 5.9, apresentam-se as soluções de reabilitação hierarquizadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

As características que mais contribuem para que a solução Fach.6 (execução de contrafachada em alvenaria pelo interior) seja a mais sustentável são: menor consumo de energia para proporcionar conforto aos seus ocupantes, melhor desempenho a nível acústico e menor custo de construção associado, quando comparada com a solução referência.

Quadro 5.9: Soluções de reabilitação de fachadas, hierarquizadas por ordem crescente de sustentabilidade

Solução	NS	
Fach.6	0,63	
Fach.2	0,62	
Fach.1	0,61	
Fach.7	0,60	
Fach.4	0,56	
Fach.8	0,54	
Fach.3	0,51	
Fach.5	0,48	

Mais sustentável

Menos sustentável

5.3. Avaliação Relativa da Sustentabilidade dos cenários de reabilitação de coberturas

A cobertura é o elemento construtivo do edifício que está sujeito às maiores amplitudes térmicas. A aplicação de isolamento térmico numa cobertura é considerada uma intervenção prioritária ao nível da eficiência energética (ADENE, LNEC, INETI & IPQ, 2004).

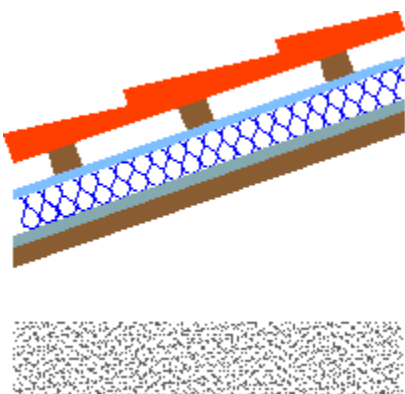
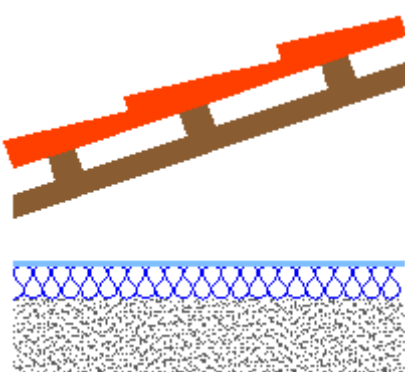
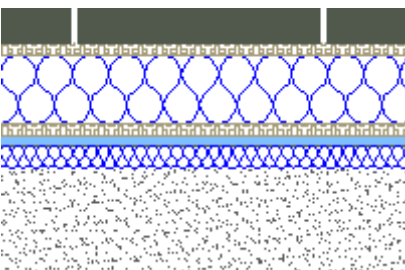
Neste trabalho serão analisadas quatro soluções de reforço de isolamento térmico nas coberturas, duas inclinadas e duas horizontais. No Quadro 5.10. apresentam-se detalhadamente as descrições de cada uma das soluções em estudo.

É de extrema importância mencionar que apesar do edifício existente possuir uma cobertura inclinada com quatro águas, avaliou-se a sustentabilidade de duas opções de reforço de isolamento térmico em coberturas horizontais, para a possibilidade de o dono de obra querer um comparação de nível de sustentabilidade entre as soluções de reforço de isolamento térmico entre as esteiras inclinadas e horizontais.

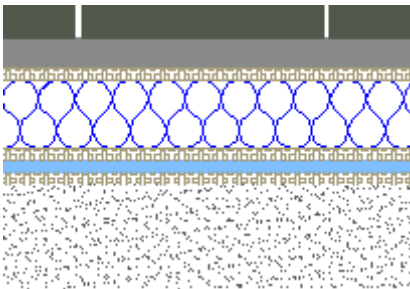
Como solução de reabilitação de referência adotou-se a solução correspondente ao reforço do isolamento térmico nas vertentes inclinadas (Cob.1). Esta consideração deveu-se ao facto desta ser uma solução convencionalmente aplicada no reforço de isolamento térmico de coberturas em Portugal. Nesta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno extrudido expandido com 0,06m de espessura, como revestimento exterior telha cerâmica de dimensões 0,465x0,27m, uma camada de impermeabilizante de silicone líquido com 0,001m de espessura e 0,003m de reboco para revestimento de teto.

A espessura do isolante térmico de cada uma das soluções foi definida tendo por base o valor de referência do coeficiente de transmissão térmica ($U=0,45\text{W/m}^2\text{°C}$) para elementos exteriores verticais em zona corrente (zonas opacas) de edifícios situados na zona climática de inverno I2, de acordo com o RCCTE. A espessura de isolamento de todas as soluções foi definida de modo a: respeitar os requisitos do RCCTE para a zona climática considerada; utilizar as espessuras de material isolante disponíveis no mercado; que todas as soluções tivessem um coeficiente global de transmissão térmica (U) semelhante ao da solução referência. Desta forma, todas as soluções apresentam um U de aproximadamente $0,44\text{W/m}^2\text{°C}$.

Quadro 5.10: Descrição das soluções de reforço de isolamento de coberturas

ID da solução	Corte esquemático	Descrição
Cob.1		<p>Reforço do isolamento térmico nas vertentes inclinadas</p> <p>Nesta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno extrudido expandido com 0,06m de espessura, como revestimento exterior telha cerâmica de dimensões 0,465 x 0,27 m, uma camada de impermeabilizante de silicone líquido com 0,001m de espessura e 0,003m de reboco para revestimento de teto</p>
Cob.2		<p>Reforço do isolamento térmico nas esteiras horizontais</p> <p>Para a execução desta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno extrudido expandido com 0,05m de espessura, como revestimento exterior em telha cerâmica de dimensões 0,465 x 0,27 m, uma camada de impermeabilizante de silicone líquido com 0,001m de espessura.</p>
Cob.3		<p>Reforço do isolamento térmico em coberturas invertidas</p> <p>Para a execução desta solução considerou-se o isolamento térmico constituído por placas de poliestireno extrudido expandido com 0,05m de espessura, a proteção pesada em lajetas de betão com 0,05m, a membrana impermeabilizante em silicone líquido com 0,001m de espessura, membrana de geotêxtil com 0,001m (por cada camada) de espessura e argamassa de proteção com 0,03m.</p>

Quadro 5.10 (cont.): Descrição das soluções de reforço de isolamento de coberturas

ID da solução	Corte esquemático	Descrição
Cob.4		<p>Reforço do isolamento térmico sobre impermeabilização existente</p> <p>Para a execução desta solução considerou-se o isolamento térmico em placas de poliestireno extrudido expandido com 0,08m de espessura, a proteção pesada em lajetas de betão com 0,05m, a membrana impermeabilizante em silicone líquido com 0,001m de espessura, membrana de geotêxtil com 0,002m (por cada camada) de espessura e argamassa de proteção com 0,03m.</p>

5.3.1. Quantificação dos Parâmetros

a) Parâmetros ambientais

Antes de se proceder à quantificação dos indicadores ambientais através da ferramenta SimaPro, procedeu-se à quantificação dos diferentes materiais utilizados na materialização das soluções construtivas, estando o resultando apresentado no Quadro 5.11.

As quantidades obtidas foram posteriormente introduzidas no SimaPro, apresentando-se no Quadro 5.12 os resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais.

Quadro 5.11: Materiais utilizados em cada solução de reabilitação e respetivas quantidades

Materiais	Cob.1 (kg/m ²)	Cob.2 (kg/m ²)	Cob.3 (kg/m ²)	Cob.4 (kg/m ²)
Argamassa de reboco	-	-	-	57,00
Armação de suporte de telhas em madeira	0,52	0,69	-	-
Lajeta de betão	-	-	82,00	82,00
Membrana impermeabilizante (silicone)	4,00	4,00	4,00	4,00
Membrana geotêxtil	-	-	4,80	3,91
Poliestireno extrudido expandido	1,95	1,63	1,63	2,60
Revestimento exterior em telha cerâmica	30,27	30,27	-	-

Quadro 5.12: Resultados obtidos na quantificação dos indicadores ambientais.

Soluções	Categorias de impacto ambiental						Energia incorporada	
	ADP (kg Sb eq)	GWP (kg CO ₂ eq)	ODP (kg CFC-11 eq)	AP (kg SO ₂ eq)	POCP (kg C ₂ H ₄ eq)	EP (kg PO ₄ eq)	ENR (MJ eq)	ER (MJ eq)
Cob.1	5,99E-01	-3,53E+02	1,42E-05	7,76E-01	3,76E-02	5,04E-02	1,39E+03	4,80E+03
Cob.2	1,25E+00	-3,54E+02	1,42E-05	7,69E-01	3,56E-02	4,98E-02	1,35E+03	4,80E+03
Cob.3	2,68E-01	3,24E+01	1,12E-05	5,56E-01	6,95E-03	1,94E-02	6,35E+02	1,61E+01
Cob.4	4,27E-01	5,00E+01	9,99E-06	6,15E-01	2,38E-02	2,52E-02	9,46E+02	1,97E+01

No Anexo I.2. encontra-se organizada a Base de Dados de LCA desenvolvida neste estudo, apresentando detalhadamente a quantificação das categorias de impacto ambiental de cada um dos materiais constituintes das soluções de reabilitação de coberturas.

b) Parâmetros Funcionais

A quantificação dos parâmetros funcionais das oito soluções de reforço de isolamento térmico de coberturas foi realizada de acordo com as metodologias apresentadas no capítulo anterior. Apresentam-se no Quadro 5.13 os resultados obtidos na quantificação dos indicadores funcionais (consumo energético e índice de isolamento a sons aéreos e de percussão).

Quadro 5.13: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros funcionais

Solução	Consumo energético (kWh/m².ano)	D_{nT,w} (dB)
Cob.1	89,90	52
Cob.2	84,24	54
Cob.3	83,28	53
Cob.4	81,85	53

No Anexo II.2. encontra-se os cálculos do índice de isolamento a sons aéreos para as quatro soluções de reforço de isolamento térmico na esteira horizontal de coberturas inclinadas.

c) Parâmetros Económicos

O Quadro 5.14 apresenta os resultados dos parâmetros económicos obtidos através da base de dados “Gerador de Preços” da ferramenta informática CYPECAD (CYPE, 2011), para os cenários de reabilitação de Coberturas em estudo.

Quadro 5.14: Resultados obtidos na quantificação dos parâmetros económicos

Solução	Custo (€/m²)
Cob.1	11,02
Cob.2	10,07
Cob.3	47,10
Cob.4	49,73

No Anexo III.2. encontra-se a Base de Dados de Custos Económicos, apresentando detalhadamente as análises económicas das soluções de reforço de isolamento térmico na esteira horizontal de coberturas inclinadas.

5.3.2. Normalização dos Parâmetros

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos para a normalização dos parâmetros em análise, Quadro 5.15.

A normalização dos oito cenários de reabilitação de Coberturas foi efetuada pela fórmula de Diaz-Balteiro, equação [4.8].

Quadro 5.15: Valores normalizadores dos parâmetros ambientais, funcionais e económicos

Solução	Ambientais				Funcionais		Económicos	
	FFDP	GWP	AP	EP	POCP	kWh/m ²	D _{nT,w}	LCC
Cob.1	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
Cob.2	0,01	1,00	0,03	0,02	0,06	0,67	1,00	1,00
Cob.3	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	0,80	0,50	0,07
Cob.4	0,94	0,00	0,73	0,81	0,45	1,00	0,50	0,00

5.3.3. Agregação dos Parâmetros

No Quadro 5.16 encontram-se apresentados os resultados obtidos na agregação dos parâmetros ambientais, os desempenhos funcionais e económicos de cada uma das soluções.

Estes valores foram obtidos através das equações [4.10], [4.11] e [4.12] que apresentam o modo de agregação dos parâmetros dentro de cada um dos indicadores.

Quadro 5.16: Desempenhos ambientais (IA), funcionais (IF) e económicos (IE) para cada um dos cenários de reabilitação

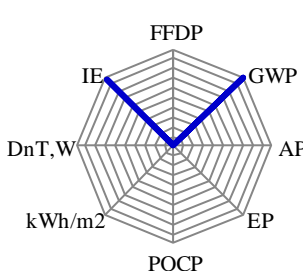
Solução	IA	IF	IE
Cob.1	0,43	0,00	0,98
Cob.2	0,45	0,75	1,00
Cob.3	0,59	0,73	0,07
Cob.4	0,41	0,87	0,00

5.3.4. Perfis Sustentáveis

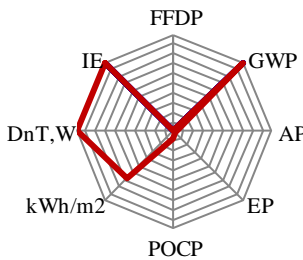
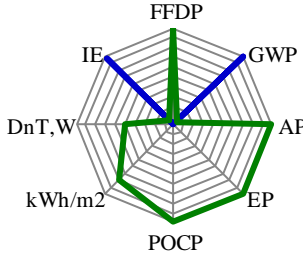
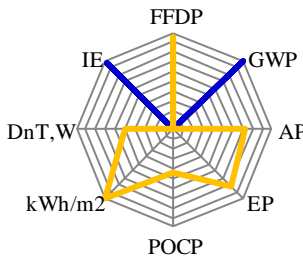
Os níveis de sustentabilidade e os perfis sustentáveis para cada um dos cenários de reabilitação de coberturas, encontram-se apresentados no Quadro 5.17.

As notas sustentáveis foram determinadas através da equação [4.13], e os perfis sustentáveis foram representados como descrito na secção 4.15.

Quadro 5.17: Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de coberturas


Solução	NS	Perfil sustentável
Cob.1	0,32	

Quadro 5.17 (cont.): Notas e perfis sustentáveis das soluções de reabilitação de coberturas

Solução	NS	Perfil sustentável
Cob.2	0,71	
Cob.3	0,55	
Cob.4	0,56	

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC aos quatro cenários de reabilitação para Coberturas, verifica-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução de reabilitação mais sustentável é a solução Cob. 2, enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução Cob.1. No Quadro 5.18 apresentam-se as soluções de reabilitação hierarquizadas por ordem decrescente de sustentabilidade.

Quadro 5.18: Soluções de reabilitação de Coberturas, hierarquizadas por ordem crescente de sustentabilidade

Solução	NS	
Cob. 2	0,71	
Cob. 4	0,56	
Cob. 3	0,55	
Cob. 1	0,32	

Em primeiro lugar, é necessário salientar que a interpretação dos resultados obtidos não pode ser alienada do conjunto de exigências funcionais que se pretende para determinada cobertura. Por outro lado, o fato de umas coberturas serem do tipo inclinada e outras do tipo horizontal poderão provocar alguns enviesamentos na interpretação dos resultados. A interpretação dos

resultados obtidos foi realizada admitindo que se pretende selecionar uma cobertura que apresente um bom desempenho funcional e ambiental, sem que comprometa o seu custo de construção.

5.4. Otimização do isolamento térmico nas soluções de fachada e cobertura

Após identificar o melhor cenário de reabilitação, num conjunto de soluções com vista à reabilitação de fachadas e coberturas, otimizou-se o comportamento do edifício em estudo, através da variação da espessura de isolamento térmico de cada um dos cenários. Para cada uma das soluções avaliou-se o comportamento relativamente ao consumo energético e custos para aquecimento e arrefecimento durante o período de um ano. A finalidade desta análise é obter a melhor combinação entre as espessuras de isolamento de fachadas e coberturas, e assim definir uma solução ideal de reabilitação ao aplicar ao edifício.

5.4.1. Otimização do isolamento térmico na solução de fachada – execução de uma contrafachada em alvenaria

Na aplicação da metodologia MARS-SC aos cenários de reabilitação de fachadas verificou-se que a solução mais sustentável era a execução de uma contrafachada em alvenaria – Fach.6.

Na solução em análise na metodologia de avaliação considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de 0,03m em poliestireno expandido extrudido. Esta solução apresenta um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de 85,20kWh/m².ano, o qual economicamente representa um custo de 744,33€/ano. No que concerne ao custo de investimento este representa um valor de 1350,94€.

No que se refere à otimização do isolamento térmico, considerou-se o aumento da espessura de isolante térmico para as espessuras de 0,05m, 0,10m, 0,15m e 0,20m.

É relevante mencionar ainda que a solução existente é uma parede de pano duplo de alvenaria de tijolo vazado de 0,11m, sem qualquer tipo de isolamento.

No Quadro 5.19 apresentam-se os consumos energéticos e os custos associados, obtidos através da simulação das diferentes espessuras de isolamento térmico.

Quadro 5.19: Consumos energéticos e custos associados para diferentes espessuras de isolamento térmico

Solução	kWh/ano	kWh/m².ano	€/ano
Solução existente	7139,01	111,55	974,47 €
Fach.6 com 0,03m de isolamento	5452,98	85,20	744,33 €
Fach.6 com 0,05m de isolamento	5384,99	84,14	735,05 €
Fach.6 com 0,10m de isolamento	5280,68	82,51	720,81 €
Fach.6 com 0,15m de isolamento	5223,00	81,61	712,94 €
Fach.6 com 0,20m de isolamento	5185,84	81,03	707,87 €

Analisando os resultados presentes no Quadro 5.19 é possível afirmar que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar é possível obter reduções significativas de consumo

energético e custos associados, quando comparado com a solução existente no edifício em estudo.

Na Figura 5.1 representa-se a poupança (€/ano) que pode ser conseguida com a implementação de cinco soluções de reabilitação, com diferentes espessuras de isolamento térmico, quando comparadas com a solução existente no edifício em estudo.

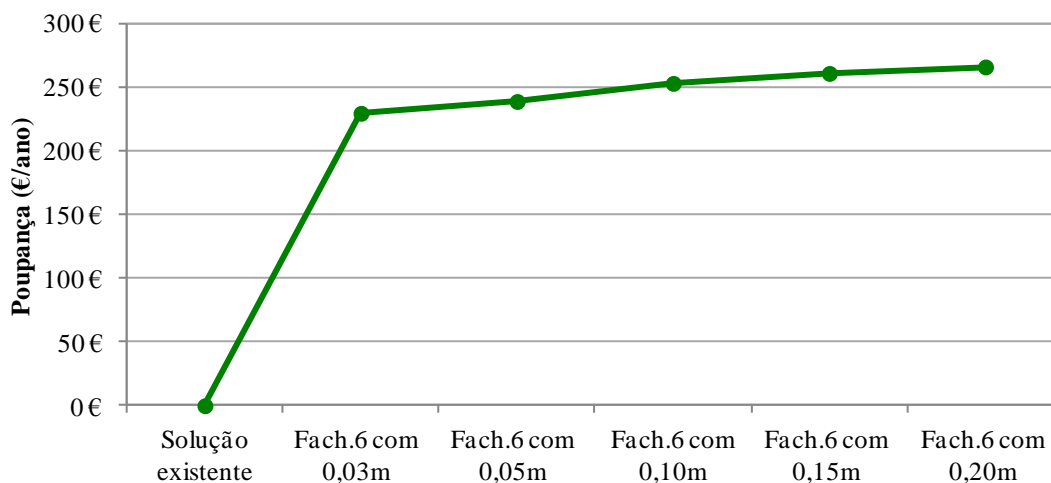


Figura 5.1: Ganhos obtidos para a otimização das espessuras de isolamento térmico

De modo a obter a espessura otimizada de poliestireno expandido extrudido e determinar a solução ideal de reabilitação a implementar na fachada do edifício existente, estudou-se o período de tempo de retorno para o investimento da reabilitação, tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação, os custos para climatização e AQS do edifício existente e das várias espessuras de isolamento térmico (Quadro 5.20).

Quadro 5.20: Valores dos custos de investimento de reabilitação e de energia para as soluções

Solução	Custo de reabilitação	Custo anual de energia
Solução existente	0,00 €	974,47 €
Fach.6 com 0,03m de isolamento	1.350,94€	744,33 €
Fach.6 com 0,05m de isolamento	1.489,27 €	735,05 €
Fach.6 com 0,10m de isolamento	1.832,23 €	720,81 €
Fach.6 com 0,15m de isolamento	2.175,91 €	712,94 €
Fach.6 com 0,20m de isolamento	2.519,59 €	707,87 €

Determinou-se o valor de energia para o primeiro ano através da equação 4.16. Para os restantes oito anos o custo da energia foi obtido através da equação 4.17.

No Quadro 5.21 apresentam-se os resultados referentes aos custos acumulados das soluções otimizadas para um período de 8 anos.

Definindo um período de retorno de investimento de 8 anos analisou-se graficamente o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualam aos das soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico. Essa análise encontra-se apresentada na Figura 5.2.

Quadro 5.21: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas para um período de 10 anos

Anos	Solução existente	Fach. 6 com 0,03 m	Fach. 6 com 0,05 m	Fach. 6 com 0,10 m	Fach. 6 com 0,15 m	Fach. 6 com 0,20 m
0	0,00€	1.350,94 €	1.489,27 €	1.832,23 €	2.175,91 €	2.519,59 €
1	944,48 €	2.095,27 €	2.224,32 €	2.553,17 €	2.888,85 €	3.227,46 €
2	1.966,03 €	2.900,34 €	3.019,35 €	3.332,94 €	3.659,97 €	3.993,09 €
3	3.028,44 €	3.737,61 €	3.846,18 €	4.143,90 €	4.461,93 €	4.789,35 €
4	4.133,35 €	4.608,37 €	4.706,09 €	4.987,30 €	5.295,97 €	5.617,46 €
5	5.282,45 €	5.513,96 €	5.600,39 €	5.864,43 €	6.163,37 €	6.478,69 €
6	6.477,52 €	6.455,77 €	6.530,46 €	6.776,65 €	7.065,46 €	7.374,37 €
7	7.720,39 €	7.435,26 €	7.497,74 €	7.725,36 €	8.003,64 €	8.305,88 €
8	9.012,98 €	8.453,93 €	8.503,70 €	8.712,01 €	8.979,35 €	9.274,65 €

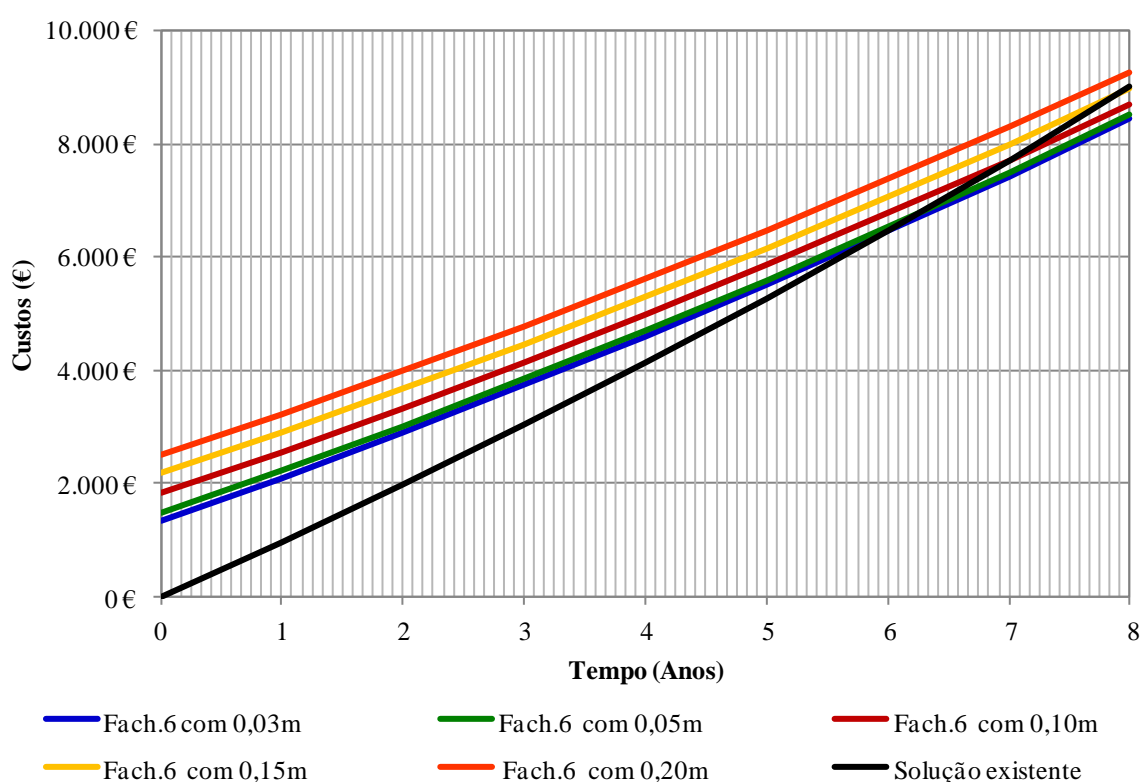


Figura 5.2: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas

Pela análise da Figura 5.2, verifica-se que os tempos de retorno do investimento correspondentes às soluções de reabilitação com espessuras de 0,03m, 0,05m, 0,10m e 0,15m são inferior a 8 anos.

A solução de reabilitação consiste na execução de um pano de alvenaria pelo interior, incorporando um material de isolamento térmico em poliestireno expandido extrudido. Esta solução tem a particularidade de reduzir a área útil dos compartimentos, isto é, quanto maior for a espessura de isolamento térmico menor será a área de compartimentação. Desta forma, determinou-se que a solução com 0,10m de isolamento em poliestireno extrudido expandido é a solução a implementar na reabilitação.

5.4.2. Otimização do isolamento térmico na solução de cobertura – reforço do isolamento térmico nas esteiras horizontais

Na aplicação da metodologia MARS-SC aos cenários de reabilitação de coberturas verificou-se que a solução com o melhor Nível de Sustentabilidade era a solução de Cob. 2 - Reforço do isolamento térmico na esteira horizontal.

Na solução em análise na metodologia de avaliação considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido expandido com 0,05m de espessura. Esta solução apresenta um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de 84,10kWh/m².ano, o qual economicamente representa um custo de 734,374€/ano. No que concerne ao custo de investimento este representa um valor de 644,48€.

No que se refere à otimização do isolamento térmico, considerou-se o aumento do isolamento térmico para as espessuras 0,10m, 0,15m e 0,20m.

É relevante mencionar ainda que a solução existente é composta por uma laje aligeirada de vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas com 0,25m de espessura e 0,02m de reboco para revestimento inferior do teto. A esteira inclinada é constituída por telhas cerâmicas apoiadas sobre uma estrutura de madeira.

No Quadro 5.22 apresentam-se os consumos energéticos e os seus custos associados, obtidos através da simulação das diferentes espessuras de isolamento térmico.

Quadro 5.22: Resultado da simulação das diferentes espessuras de poliestireno expandido extrudido para a otimização da solução de reabilitação de execução de uma contrafachada em alvenaria

Solução	kWh/ano	kWh/m ² .ano	€/ano
Solução existente	7139,01	111,55	974,47 €
Cob.2 com 0,05m de isolamento	5382,71	84,10	734,74 €
Cob.2 com 0,10m de isolamento	5090,44	79,54	694,85 €
Cob.2 com 0,15m de isolamento	4989,50	77,96	681,07 €
Cob.2 com 0,20m de isolamento	4901,36	76,58	669,04 €

Analisando os resultados presentes no Quadro 5.22 é possível afirmar que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar no reforço de isolamento térmico na esteira horizontal é possível obter reduções significativas de consumo energético e custos associados, quando comparado com a solução existente no edifício em estudo.

Na Figura 5.3 apresentam-se os valores de poupança energética anual (€/ano) que podem ser conseguidos com a implementação das quatro soluções de reabilitação, com diferentes espessuras de isolamento térmico, quando comparadas com a solução existente no edifício em estudo.

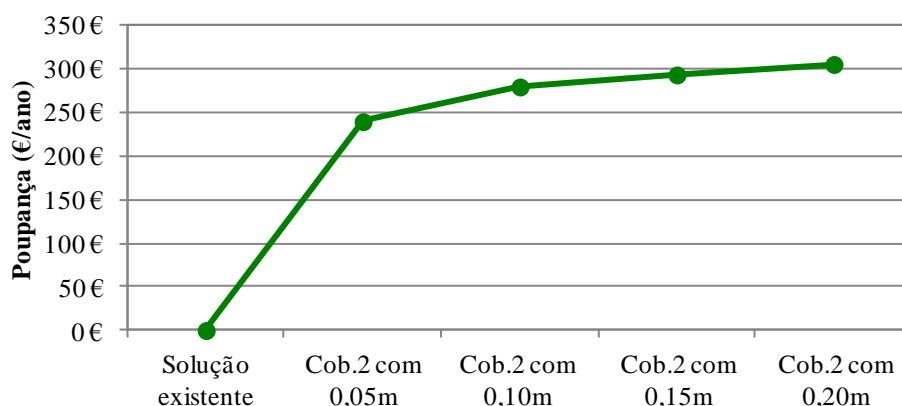


Figura 5.3: Valores de poupança obtidos para a otimização das espessuras de isolamento térmico

De modo a obter a espessura otimizada de poliestireno extrudido expandido e determinar a solução ideal implementar no reforço do isolamento na esteira horizontal do edifício existente estudou-se o período de tempo de retorno para o investimento da reabilitação, tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação, os custos para climatização e AQS do edifício existente e das várias espessuras de isolamento térmico (Quadro 5.23).

Quadro 5.23: Valor dos custos de investimento de reabilitação e de energia para a solução existente e para as soluções de diferente espessura de isolamento térmico a aplicar no reforço de isolamento na esteira horizontal

Solução	Custo de reabilitação	Custo anual de energia
Solução existente	0,00 €	944,48 €
Cob.2 com 0,05m de isolamento	644,48 €	734,74 €
Cob.2 com 0,10m de isolamento	949,76 €	694,85 €
Cob.2 com 0,15m de isolamento	1.254,40 €	681,07 €
Cob.2 com 0,20m de isolamento	1.559,68 €	669,04 €

O valor de energia para o primeiro ano através da equação [4.16]. Para os restantes oito anos o custo da energia foi obtido através da equação [4.17]. No Quadro 5.24. apresentam-se os resultados referentes aos custos acumulados das soluções otimizadas para um período de 8 anos.

Quadro 5.24: Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas para um período de 10 anos

Anos	Solução existente	Solução com 0,05 m	Solução com 0,10 m	Solução com 0,15 m	Solução com 0,20 m
0	0,00 €	644,48 €	949,76 €	1.254,40 €	1.559,68 €
1	944,48 €	1.379,22 €	1.644,61 €	1.935,47 €	2.228,72 €
2	1.966,03 €	2.173,91 €	2.396,16 €	2.672,12 €	2.952,35 €
3	3.028,44 €	3.000,40 €	3.177,77 €	3.438,23 €	3.704,93 €
4	4.133,35 €	3.859,94 €	3.990,65 €	4.234,98 €	4.487,61 €
5	5.282,45 €	4.753,86 €	4.836,04 €	5.063,61 €	5.301,60 €
6	6.477,52 €	5.683,54 €	5.715,25 €	5.925,38 €	6.148,15 €
7	7.720,39 €	6.650,41 €	6.629,62 €	6.821,62 €	7.028,56 €
8	9.012,98 €	7.655,95 €	7.580,57 €	7.753,71 €	7.944,19 €

Definindo um período de retorno de investimento de 8 anos, analisou-se graficamente o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualam aos das soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico para o reforço de isolamento térmico em coberturas (Figura 5.4).

Pela análise da Figura 5.4, verifica-se que as todas as soluções estão dentro do intervalo de tempo necessário para que a soma dos benefícios iguale à solução para manter o edifício, num período inferior a 8 anos.

Dado que a solução de reabilitação é o reforço de isolamento térmico de uma cobertura inclinada na esteira horizontal e sabendo que quanto maior for a espessura de isolamento a aplicar melhor será o seu desempenho técnico-funcional e a facilidade associada à execução desta solução de reabilitação, assumiu-se que a espessura de poliestireno expandido extrudido a implementar na solução de reforço de isolamento térmico da esteira horizontal, Cob. 2, é de 0,20m de espessura.

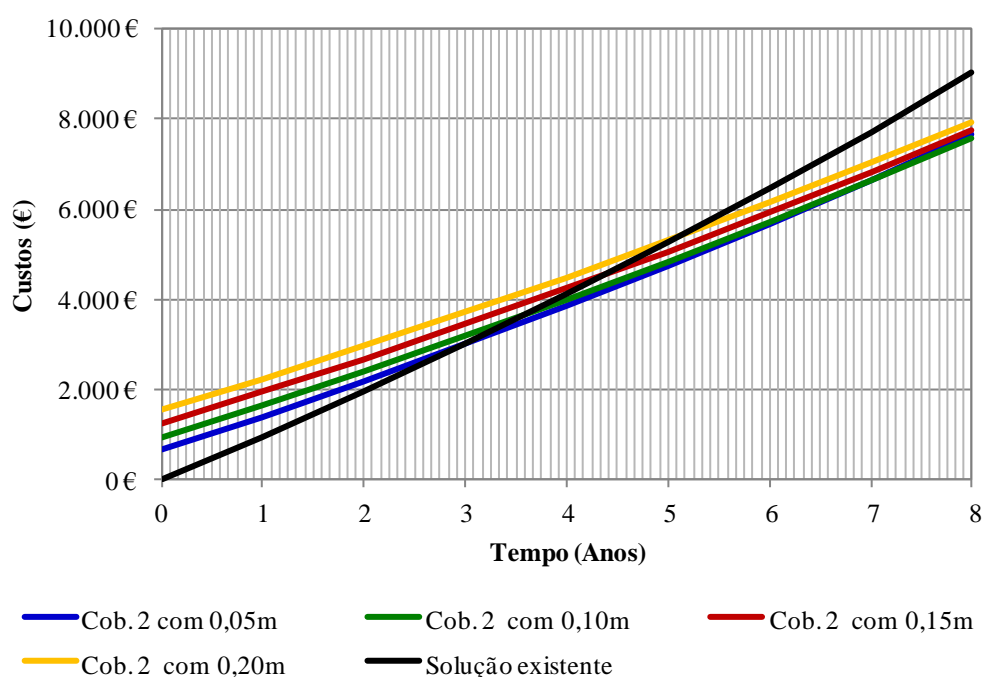


Figura 5.4 Custos acumulados da solução existente e das soluções otimizadas

5.4.3. Avaliação dos custos associados à solução otimizada

Após a otimização do isolamento térmico nas soluções de fachada e cobertura, definiu-se que a solução ideal a implementar na reabilitação é composta com as espessuras de 0,10m (fachada) e 0,20m (cobertura) de isolamento térmico em poliestireno extrudido expandido.

O Quadro 5.25 apresenta os consumos energéticos e os seus custos associados, obtidos através da simulação da solução ideal de reabilitação na ferramenta DesignBuilder (DesignBuilder, 2012).

Quadro 5.25: Resultado da simulação da combinação das soluções otimizadas de isolamento térmico na fachada e cobertura em comparação com a solução existente no edifício

Solução	kWh/ano	kWh/m ² .ano	€/ano
Solução existente	7139,01	111,55	974,47 €
Solução ideal	4106,23	64,10	560,50 €

Na Figura 5.5 apresenta-se graficamente a comparação da energia despendida para aquecimento e arrefecimento no edifício existente e no edifício reabilitado, com a combinação das soluções otimizadas de reabilitação da fachada e cobertura.

Através da simulação da solução ideal de reabilitação constatou-se que a implementação desta solução no edifício existente proporciona uma redução de 42% no consumo de energia despendida para aquecimento e arrefecimento do edifício.

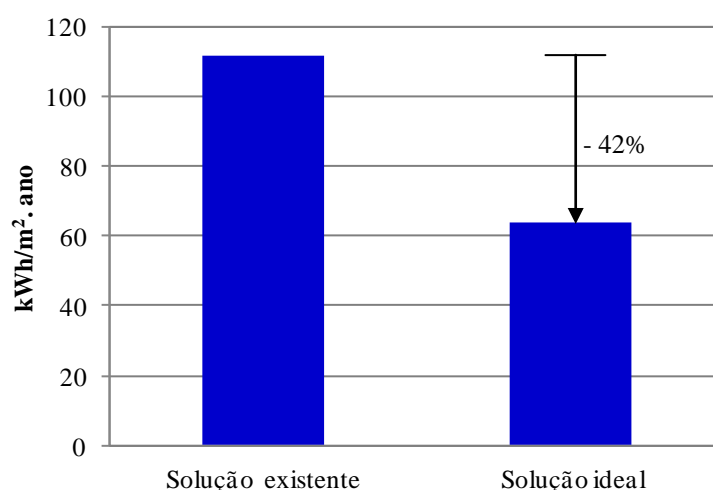


Figura 5.5: Consumo de energia em kWh/m².ano para a solução do edifício existente e para o edifício reabilitado

A Figura 5.6 apresenta graficamente os ganhos que podem ser atingidos com a implementação da combinação das soluções de reabilitação de fachada e cobertura.

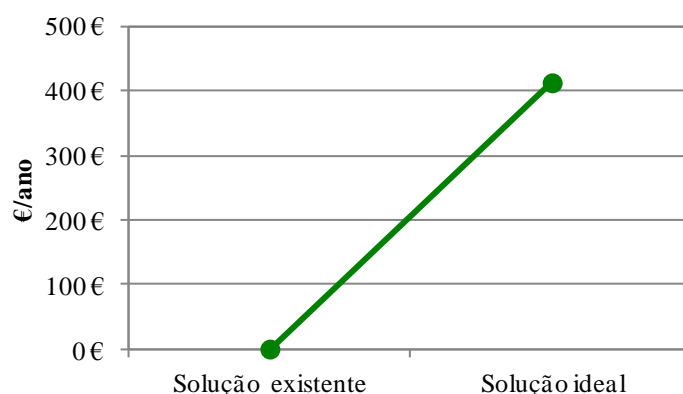


Figura 5.6: Valores de poupança que podem ser obtidos com a reabilitação do edifício

No que concerne aos custos económicos de energia consumida para climatização do edifício existente, a solução existente apresenta 974,47€/ano e a solução de reabilitação apresenta um valor de 560,50€/ano, isto é, menos 413,97€/ano.

Tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação e os custos de energia do edifício existente, através das equações [4.16] e [4.17]. No Quadro 5.26. apresentam-se os resultados referentes aos custos acumulados das soluções otimizadas para um período de 8 anos.

Quadro 5.26: Valores dos custos acumulados para o edifício existente e reabilitado

Ano	Ed. Existente	Ed. Reabilitado
0	0,00 €	3.382,95 €
1	944,48 €	3.943,45 €
2	1.966,03 €	4.549,69 €
3	3.028,44 €	5.180,17 €
4	4.133,35 €	5.835,88 €
5	5.282,45 €	6.517,81 €
6	6.477,52 €	7.227,02 €
7	7.720,39 €	7.964,60 €
8	9.012,98 €	8.731,69 €

Na Figura 5.7 representam-se os valores dos custos acumulados para o edifício e onde é visível o período de retorno do investimento da implementação de poliestireno extrudido expandido na fachada com 0,10m e 0,20m no reforço do isolamento térmico na esteira horizontal da cobertura.

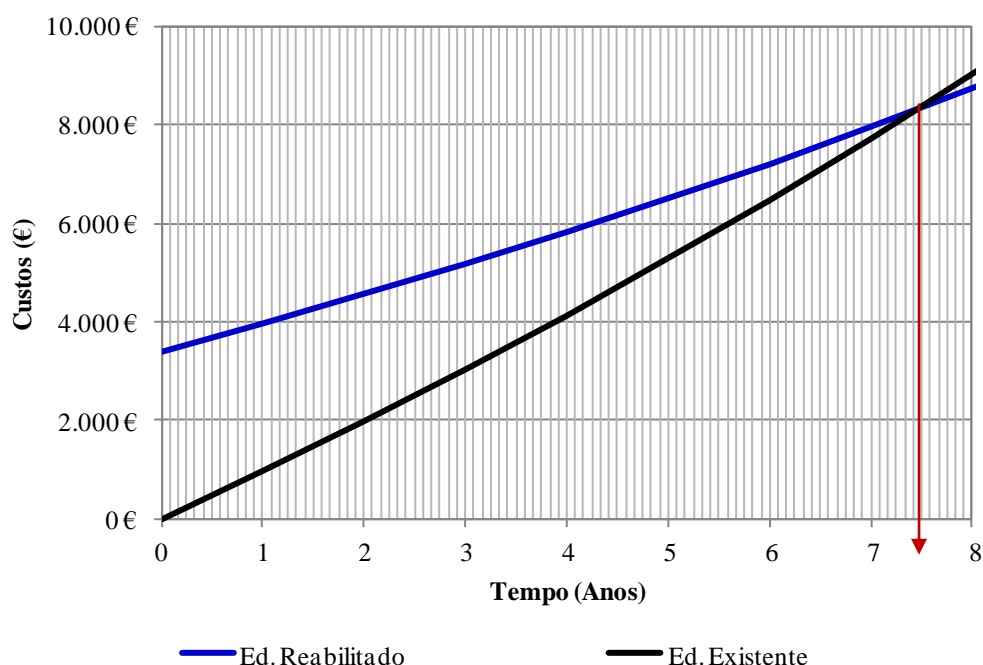


Figura 5.7: Valores dos custos acumulados do investimento de reabilitação no edifício em comparação com o edifício existente

Analisando a Figura 5.7 verifica-se que o tempo de retorno de investimento da implementação das duas soluções de reabilitação no edifício (cobertura+paredes exteriores) é de 7 anos e 5 meses.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Discussão dos resultados e conclusões

O setor da construção tem sobre o ambiente um grande efeito e apresenta um importante papel no cumprimento das metas para um desenvolvimento sustentável. O impacto ambiental causado pela indústria da construção e pelas empresas produtoras da grande variedade de materiais é muito forte. Este sector está relacionado com a exploração intensiva de florestas e pedreiras, a extração inadequada de areias, o consumo crescente de energia, a deposição ilegal de resíduos, entre outros, o que tem elevados reflexos negativos nos ecossistemas, na perda da biodiversidade e concretamente na construção saudável a que todos os seres humanos têm direito. Sendo a construção responsável por grande parte destes malefícios, parar com a construção nova e apostar na reabilitação é o caminho mais sensato a seguir

No segundo capítulo deste trabalho foi feita uma abordagem à evolução e caracterização do parque habitacional português, envolvendo uma análise às características que dizem respeito à época de construção dos edifícios. A necessidade de reabilitação do parque habitacional em Portugal é evidente, dado o estado de conservação em que o mesmo encontra. O setor doméstico consome cada vez mais energia, a eficiência energética do parque habitacional é muito fraca, a falta de conforto térmico é corrente, a qualidade do ar interior é pouco valorizada, e o consumo de água no setor doméstico é elevado.

Para além dos problemas intimamente relacionados com as habitações, a própria fase de construção é desenvolvida de uma forma pouco sustentável e sem qualquer preocupação com o ambiente. A taxa de reciclagem dos resíduos de construção e demolição é muito baixa e a proteção das características ecológicas e ambientais dos locais de implantação são negligenciadas.

É de extrema importância resolver os problemas correntes do parque edificado habitacional, respondendo simultaneamente à necessidade de melhorar os níveis de sustentabilidade ambiental, económica e social dos mesmos.

De forma a combater a degradação do parque habitacional, o Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana (IHRU) tem sobre sua orientação quatro programas de apoio e incentivo à reabilitação dos edifícios, nomeadamente o RECRIA, o REHABITA, o RECRIPH e o SOLARH. Estes programas têm por finalidade incentivar a intervenção dos privados no património construído, resolver deficiências e anomalias construtivas, ambientais e funcionais acumuladas ao longo do tempo; procurar a modernização e beneficiação dos imóveis, melhorando o seu desempenho funcional e tornando-os aptos para a sua utilização.

A reabilitação energética de um edifício existente é uma abordagem importante, que tem por objetivo melhorar a qualidade térmica e racionalizar a gestão da energia.

A eficiência energética de edifícios envolve a redução do consumo de energia ao mesmo que se mantém níveis aceitáveis de conforto, qualidade do ar, entre outros requisitos.

As medidas de reabilitação energética a implementar num edifício podem ser de quatro géneros: reforço da proteção térmica conferida pela envolvente dos edifícios; controlo das infiltrações de ar; recurso a tecnologias solares, passivas e ativas e melhoria da eficiência energética dos sistemas e equipamentos energéticos.

O terceiro capítulo deste trabalho dedica-se ao estudo de cenários para a reabilitação da envolvente exterior de um edifício de habitação através do reforço da proteção térmica. A promoção do conforto térmico traduzido num controlo mais eficiente da temperatura ambiente interior irá traduzir-se na necessidade de melhorar o isolamento da envolvente exterior dos edifícios.

O reforço do isolamento térmico das paredes exteriores admite três grandes opções, caracterizadas pelas diferentes localizações possíveis do isolamento térmico a aplicar. O reforço pode ser realizado pelo exterior, interior ou através de injeção nas caixas-de-ar, limitando-se esta última solução ao caso de paredes duplas.

No que concerne ao reforço de isolamento térmico em coberturas, este depende do tipo de cobertura, ou seja, se é do tipo inclinada ou horizontal. No que respeita às coberturas inclinadas, consideram-se dois procedimentos de reforço de isolamento, em que se diferenciam pelo elemento da cobertura no qual se aplica o isolante térmico, na esteira horizontal (caso o desvão não seja habitável) ou isolamento das vertentes (caso o desvão seja habitável). Para o reforço do isolamento em coberturas horizontais, existem três grandes opções, dependentes da localização desse isolamento, reforço do isolamento térmico na parte superior, intermédia ou inferior.

No quarto capítulo apresentou-se a metodologia de investigação a aplicar a um caso de estudo com a finalidade de identificar e otimizar o melhor cenário de reabilitação de fachadas e coberturas de um edifício. Numa primeira parte do caso de estudo pretendeu-se hierarquizar os cenários de reabilitação de fachadas e coberturas de acordo com seu nível de sustentabilidade. Esta análise foi conduzida através da Metodologia de Avaliação Relativa da Sustentabilidade de Soluções Construtivas – MARS-SC.

Analisando os resultados obtidos na aplicação da metodologia MARS-SC aos oito cenários de reabilitação para fachadas, verificou-se que, dentro desta amostra e de acordo com os parâmetros analisados, a solução de reabilitação mais sustentável corresponde a execução de uma contrafachada de alvenaria (Fach.6), enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução de rebocos isolantes (Fach.5).

Em relação à análise da sustentabilidade dos cenários de reabilitação de coberturas, a solução que obteve o melhor nível de sustentabilidade foi a solução de reforço do isolamento térmico na esteira horizontal de uma cobertura inclinada (Cob.2), enquanto a solução de reabilitação menos sustentável é a solução de reforço do isolamento térmico nas vertentes inclinadas de uma cobertura inclinada (Cob.1).

Após identificar o melhor cenário de reabilitação, num conjunto de soluções com vista à reabilitação de fachadas e coberturas, otimizou-se no edifício em estudo, e para cada um dos cenários, a espessura de isolamento térmico.

No procedimento da otimização do isolamento térmico nas soluções de fachadas, a solução em análise foi a execução de uma contrafachada de alvenaria - Fach.6 (solução que obteve o melhor nível de sustentabilidade dentro das soluções de reabilitação de fachadas). Nesta solução, Fach.6, considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de 0,03m em poliestireno expandido extrudido. Esta solução apresentou um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de $85,20\text{kWh/m}^2\text{.ano}$, o qual economicamente representa um custo de 744,33€/ano e um custo de investimento em reabilitação de este representa um valor de 1350,94€.

No que se refere à otimização do isolamento térmico na solução de fachada, considerou-se o aumento da espessura de isolante térmico para as espessuras de 0,05m, 0,10m, 0,15m e 0,20m.

Para o aumento de 0,05m de espessura de isolamento térmico na solução de fachada obteve-se através da simulação energética um consumo de $84,14\text{kWh/m}^2\text{.ano}$ que em termos de custos corresponde a 735,05 €/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 1.489,27€.

No que concerne ao aumento de espessura de poliestireno extrudido expandido na solução de fachada para 0,10m, obteve-se um consumo energético de $82,51\text{kWh/m}^2\text{.ano}$, que em termos de custos corresponde a 720,81€/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 1.832,23€.

Relativamente ao aumento da espessura de isolamento térmico na fachada para 0,15m, apurou-se através da simulação um consumo energético de $81,61\text{kWh/m}^2\text{.ano}$, correspondendo a um custo económico de 712,94€/ano. Esta solução apresenta um investimento em reabilitação no valor de 2.175,91€.

Aumentando para 0,20m de espessura de poliestireno extrudido expandido na solução de fachada, obteve-se um consumo energético no valor de $81,03\text{kWh/m}^2\text{.ano}$ o qual corresponde a um custo de 707,87€/ano. Esta solução apresenta um investimento em reabilitação no valor de 2.519,59€.

Com os resultados obtidos verificou-se que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar na reabilitação é possível obter reduções significativas de consumo energético e custos associados, quando comparado com a solução existente no edifício em estudo.

De modo a obter a espessura otimizada de poliestireno expandido extrudido e determinar a solução ideal de reabilitação a implementar na fachada do edifício existente, estudou-se o período de tempo de retorno para o investimento da reabilitação, tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação, os custos para climatização e AQS do edifício existente e das várias espessuras de isolamento térmico. Definiu-se um período de retorno de investimento de

8 anos e analisou-se o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualavam às soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico. Concluiu-se que os custos acumulados da solução existente igualavam os custos acumulados das soluções com espessura de isolante térmico de 0,03, 0,05m, 0,10m e 0,15m num período inferior a 8 anos.

Com os resultados alcançados na otimização do isolamento térmico na solução de fachada, determinou-se que a solução que incorporava um isolamento térmico em poliestireno expandido extrudido com 0,10m de espessura seria a solução a implementar na reabilitação da fachada do edifício.

No procedimento da otimização do isolamento térmico nas soluções de coberturas, a solução em análise foi o reforço do isolamento térmico na esteira horizontal de uma cobertura inclinada - Cob.2 (solução que obteve o melhor nível de sustentabilidade na análise de soluções de reabilitação de coberturas). Nesta solução, Cob.2, considerou-se a aplicação de placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido expandido com 0,05m de espessura. Esta solução apresenta um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de $84,10\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, o qual economicamente representa um custo de 734,374€/ano. No que concerne ao custo de investimento este representa um valor de 644,48€.

No que se refere à otimização do isolamento térmico na solução de cobertura, considerou-se o aumento da espessura de isolante térmico para as espessuras de 0,10m, 0,15m e 0,20m.

Para o aumento de 0,10m de espessura de isolamento térmico na solução de cobertura obteve-se um consumo energético de $79,54\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, que em termos de custos corresponde a 694,85 €/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 949,76€.

No que concerne ao aumento de espessura de poliestireno extrudido expandido no reforço de isolamento térmico para 0,15m, apurou-se que a mesma proporcionava um consumo energético de $77,96\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, que correspondia a um custo de 681,07€/ano. Esta solução apresenta um custo de investimento em reabilitação de 1.254,40€.

Relativamente ao aumento da espessura de isolamento térmico na esteira horizontal da cobertura para 0,20m, obteve-se um consumo energético de $76,58\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$, que em termos de custos corresponde a 669,04€/ano. Esta solução apresenta um investimento em reabilitação no valor de 1.559,68€.

Com os resultados obtidos verificou-se que qualquer que seja a espessura de isolamento a implementar no reforço de isolamento térmico na esteira horizontal da cobertura, é possível obter reduções significativas de consumo energético e custos associados, quando comparado com a solução existente no edifício em estudo.

De modo a obter a espessura otimizada de poliestireno expandido extrudido e determinar a solução ideal de reabilitação a implementar no reforço do isolamento térmico da esteira horizontal na cobertura, estudou-se o período de tempo de retorno para o investimento da reabilitação, tendo em atenção os custos de investimento de reabilitação, os custos para

climatização e AQS do edifício existente e das várias espessuras de isolamento térmico. Após definir um período de retorno de investimento de 8 anos, analisou-se em que ano os custos acumulados da solução existente igualavam-se às soluções com diferentes espessuras de isolamento térmico. Verificou-se que todas as soluções em análise, com espessura de isolante térmico de 0,05m, 0,10m, 0,15m e 0,20m, estavam dentro do intervalo de tempo necessário para que a soma dos benefícios iguale à solução para manter o edifício, inferior a 8 anos.

Uma vez que a solução de reabilitação de cobertura era o reforço de isolamento térmico de uma cobertura inclinada na esteira horizontal e dado que quanto maior a espessura de isolamento a aplicar melhor é o desempenho técnico-funcional determinou-se que a espessura de poliestireno extrudido expandido a implementar na solução de reforço de isolamento térmico da esteira horizontal (Cob. 2) seria de 0,20m de espessura.

Após a otimização do isolamento térmico nas soluções de fachada e cobertura, definiu-se então, que a solução ideal a implementar na reabilitação do edifício existente seria a aplicação de placas de isolamento térmico com espessura de 0,10m em poliestireno expandido extrudido na solução de fachada e 0,20m de isolamento em poliestireno expandido extrudido no reforço de isolamento térmico na esteira horizontal da cobertura inclinada.

A implementação desta solução no edifício existente apresentou um consumo energético de aquecimento e arrefecimento para o período de um ano de $64,10\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$. No que concerne aos custos económicos de energia consumida para climatização do edifício existente, a solução existente possuía um custo de 974,47€/ano e a solução de reabilitação apresentou um valor de 560,50€/ano, isto é, menos 413,97€/ano, proporcionando assim uma redução de 42% no consumo de energia despendida para aquecimento e arrefecimento do edifício.

Para um período de retorno de investimento de 8 anos, analisou-se o ano em que os custos acumulados da solução existente se igualavam à solução de reabilitação a implementar. Concluiu-se que os que os custos acumulados (de investimento na reabilitação mais os custos de energia para climatização) se igualavam aos da solução de manter o edifício existente aproximadamente ao fim de 7 anos e 5 meses, ou seja, num período inferior a 8 anos.

Através do caso de estudo conduzido neste trabalho, conclui-se que a reabilitação constitui assim uma das vias mais promissoras para a correção de situações de inadequação funcional, proporcionando a melhoria da qualidade térmica e das condições de conforto dos seus habitantes. Simultaneamente permite reduzir o consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, ventilação e iluminação, contribuindo também para o objetivo estratégico de redução das necessidades energéticas do país e possibilitando, em muitas situações, a correção de certas patologias ligadas à presença de humidade e à deterioração do aspeto nos edifícios.

6.2.Perspetivas futuras

Em Portugal até há alguns anos atrás, a reabilitação era sistematicamente relegada para um plano de importância inferior, em relação à construção nova. Nas duas últimas décadas, tem-

se verificado um aumento gradual e progressivo do peso da reabilitação no setor da construção.

Se por um lado, grande parte do parque habitacional em Portugal é bastante recente, onde cerca de 20% dos edifícios tem menos de 10 anos, na maioria dos casos estes apresentam anomalias significativas, motivadas, principalmente pelos seguintes fatores: falta de rigor e qualidade no projeto; existência de poucos exemplos de trabalhos de investigação realizados; deficiente execução e aplicação perniciosos dos materiais. Estes fatores, tenderão a acelerar a necessidade da realização de operações de conservação e reabilitação.

Este trabalho de investigação, como outros tantos, não esgota este tema tão vasto que é o da reabilitação sustentável. Os estudos que foram desenvolvidos deverão ser ajustados/atualizados periodicamente, em função da natural evolução científica e tecnológica e dos resultados que forem sendo obtidos com a sua aplicação na prática. Para o efeito, propõem-se os seguintes desafios para os trabalhos de futuro:

- Ampliação do estudo de soluções de reabilitação para a envolvente exterior de edifícios de habitação implementadas em outros países;
- Desenvolvimento de uma base de dados com a caracterização técnico-funcional e económica de cada uma das soluções de reabilitação;
- Realizar o estudo considerando um edifício multifamiliar com a finalidade de analisar o conforto que as soluções proporcionam;
- Estudar as diversas soluções nas diferentes regiões climáticas em Portugal definidas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios.

Espera-se, que este estudo contribua de forma positiva e significativa nas tomadas de decisão dos projetistas que tenham como objetivo proporcionar excelentes condições de conforto aos seus utilizadores, a um patamar mínimo de custos e impactes ambientais. Este estudo salienta a importância da análise do tempo de retorno do investimento na construção, de forma a mostrar aos clientes a relevância de não se focarem apenas no custo inicial das intervenções de reabilitação, pois com determinados investimentos é possível aumentar o conforto dos utilizadores e reduzir significativamente os custos de utilização em períodos de retorno curtos (até 8 - 10 anos).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENE, LNEC, INETI & IPQ (2004). **Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais**. Informação disponível online em [<http://www.adene.pt/NR/rdonlyres/00000008f/dlsmbizoqgvncjxjfdkgikimrulbfcqg/Reabilitaçãoenergética.pdf>], acedido em 17 de junho de 2010.

Amado, M.P. (2007). **Sustainable Building**. XXXV IAHS World Congress on Housing Science, Austrália.

Appleton, João (2003). **Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e tecnologias de intervenção**. Edições Orion. Amadora, Portugal.

Boustead, I. e Hancock, G. F. (1979). **Handbook of Industrial Energy Analysis**. Elis Horwood Ltd.

Bragança, Luís; Mateus, Ricardo (2011). **Avaliação do ciclo de vida dos edifícios. Impacte ambiental de soluções construtivas**. Multicomp. Portugal.

Bragança, Luís; Mateus, Ricardo; Koukkari, Heli (2007). **Assessment of Building Sustainability**. Sustainability of Constructions Integrated Approach to Life-time Structural Engineering – COST Action C25. L. Bragança, H. Koukkari, R. Blok, H. Gervásio, M. Veljkovic, Z. Plewako, R. Landolfo, V. Ungureanu, L.S. Silva, Portugal.

Chaves, Ana. (2009) **Patologia e Reabilitação de Revestimentos de Fachadas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil: Guimarães.

Climatização (2011). **Pacote de incentivos à reabilitação urbana pode ficar pelo caminho**. Informação online disponível em [<http://www.climatizacao.pt/edicoes/maio2011/reabilitacao-urbana.aspx>], acedido em 18 de Abril de 2012.

CML (2001). **CML 2 Baseline Method (2000)**. Centre for Environmental Studies (CML), University of Leiden, 2001. Informação online disponível em [<http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/lca2/index.html>] acedido em 15 de Fevereiro de 2012.

Cóias, Vítor (2007). **Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos**. Argumentum. Lisboa, Portugal.

Comissão Europeia (2006). **Cidades Europeias Sustentáveis**. Resumo do relatório do Grupo de Peritos sobre o ambiente Urbano, Direcção-Geral XI Ambiente, Segurança Nuclear e Protecção Civil, Comissão Europeia. Bruxelas. Informação online disponível em [<http://ec.europa.eu/environment/urban/pdf/rport-pt.pdf>] acedido em 25 de Junho de 2012.

CYPE (2011). **CYPECAD (Versão After Hours)**. Software para engenharia e Construção versão 2011. Portugal.

DesignBuilder (2012). **DesignBuilder**. Building design, simulation and visualisation software version 3.0.0.105. DesignBuilder Software Ltd. London, United Kingdom.

Diário da República, 1.^a série — N.º 58 — 23 de março de 2011

Diaz-Balteiro, L. & Romero C. 2004. **In a Search of a Natural Systems Sustainability Index**. Ecological Economics 49. P. 401-405.

EN 12354-3 (2000). **Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements**. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.

EPA & SBA (2000). **Reducing risk: setting priorities and strategies for environmental protection**. Washington, DC, United States: EPA (Environmental Protection Agency). SAB-EC90e02113e14.

EPA (2000). **Toward integrated environmental decisionmaking**. Washington, DC, United States: EPA (Environmental Protection Agency). EPA-SAB-EC00e011.

Governo da República Portuguesa. (2009) **Pacote de incentivo à reabilitação urbana**. Informação disponível online em [http://www.pcm.gov.pt/pt/GC18/Noticias/Pages/20110317_Not_CM_Reabilitacao_Urbana.aspx] acedido em 18 de Abril de 2012.

Guimarães, João (2009). **Técnicas tradicionais de construção, anomalias e técnicas de intervenção em fachadas e coberturas de edifícios antigos**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal.

IHRU (2011). **IHRU - Missão e objetivos**. Instituto de Habitação e da Reabilitação Urbana, Lisboa. Informação disponível online em www.portaldahabitacao.pt

INE (2001). **Censos 2001 – Resultados Definitivos**. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Informação disponível online em www.ine.pt.

INE (2009). **Estatísticas da Construção e Habitação 2008**. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Informação disponível online em www.ine.pt.

INE (2010). **Estatísticas da Construção e Habitação 2010**. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Informação disponível online em www.ine.pt.

INE (2011). **Censos 2011 – Resultados Preliminares**. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa. Informação disponível online em www.ine.pt.

ISO 14040 (2006). **Environmental Management – Lyfe Cycle Assessment – Principles and Framework**. International Organization for Standardization.

ISO 14040 (2006). **Environmental Management – Lyfe Cycle Assessment – Requirements and Guidelines**. International Organization for Standardization.

ISO/TC 21929-1 (2006). **Sustainability in building construction – Sustainability indicators - part1: Framework for the Development of indicators for buildings**. Geneva. International Organization for Standardization.

Jardim, Fátima. (2009). **Proposta de Intervenção de Reabilitação Energética de Edifícios de Habitação**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil - Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade da Construção. Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil: Guimarães, Portugal.

Kasser, U. e Pöll, M. (1999). **Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie**. 307. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.

Kibert, Charles J. (1994). **Establishing Principles and Model for Sustainable Construction**, in Proceedings of the First International Conference of CIB TG 16, Tampa, EUA.

Lauria, Alejandro (2007). **Sustentabilidade na Construção**. Verlag Dashöfer. Lisboa, 2007.

LNEC (2006). **ITE 50 – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios**. LNEC, Lisboa, Portugal.

Lopes, Tânia (2010). **Reabilitação Sustentável de Edifícios de Habitação**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil – Perfil de Construção. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa: Departamento de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Mateus, Diogo Manuel Rosa; Tadeu, António José Barreto (1999). **Comportamento Acústico de Edifícios**. Laboratório de Construções, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

Mateus, Ricardo; Bragança, Luis (2006). **Tecnologias Construtivas com Tecnologias Construtivas para a Sustentabilidade da Construção**. Edições Ecopy: Porto. ISBN 978-989-95194-1-1.

Mateus, Ricardo (2004). **Novas Tecnologias Construtivas com vista à Sustentabilidade Construção**. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil: Guimarães.

Mateus, Ricardo (2009). **Avaliação da Sustentabilidade da Construção, Propostas para o desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis**. Tese de Doutoramento Engenharia Civil/Processos de Construção. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil: Guimarães.

Maxit (2002). **Isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Reboco delgado armado sobre poliestireno expandido – ETICS**. Relatório – HT 191A/02, Maxit – Tecnologias de Construção e Renovação, Lda., Porto.

Meisser, Mathias (1973). **Acustica de los Edifícios**. Editores Técnicos Associados, S.A., Barcelona, 1973 (Tradução do título original “La Pratique de L’Acoustique dans les Batimennts”, S.D.T.B.T.P., Paris.

Natural Works (2011). **DesignBuilder**. Informação online disponível em [<http://www.natural-works.com/db/>], acedido em 14 de novembro de 2011.

NP EN ISO 717-1 (2002). **Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção**. Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea.

OCDE (2002). **Design of Sustainable Building Policies: Scope for Improvement and Barriers**. Organização para a Cooperação Económica e Desenvolvimento. Paris.

Oliveira, Nuno (2009). **Teoria e Prática de Técnicas de Construção e Conservação de Coberturas do Séc. XVIII: Evolução Histórica, Tratadística do séc. XVIII, diagnóstico de anomalias e restauro estrutural**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Departamento de Engenharia Civil: Vila Real.

Paiva, J.V., Aguiar, J. e Pinho, A. (2006). **Guia Técnico de Reabilitação Habitacional**. Instituto Nacional da Habitação e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.

Patrício, Jorge (2003). **Acústica nos Edifícios**. Edição de autor.

Pimentel, D. (1973). **Food Production and the Energy Crisis**. Science, 182(4111), pp.443-449.

Portal da Habitação (2012a)). **REHABITA**. Informação online disponível em [<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/reabilitacao/apoios/rehabita.html>] acedido em 20 de Março de 2012.

Portal da Habitação (2012b)). **RECRIPH**. Informação online disponível em [<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/reabilitacao/apoios/recriph.html>] acedido em 20 de Março de 2012.

Portal da Habitação (2012c)). **SOLARH**. Informação online disponível em [<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/reabilitacao/apoios/solarh.html>] acedido em 20 de Março de 2012.

Portal da Habitação (2012d)). **REHABITA**. Informação online disponível em [<http://www.portaldahabitacao.pt/pt/portal/reabilitacao/apoios/rehabita.html>] acedido em 20 de Março de 2012.

RCCTE (2006). **Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE)**. Decreto-Lei 80/2006.

PRé-consultants (2008). **SimaPro Database Manual – Methods Library**. Amersfoort, The Netherlands: Product Ecology Consultants.

PRé-consultants (2010). **SimaPro 7**. LCA software version 7.2. Amersfoort, The Netherlands: Product Ecology Consultants.

PRé-consultants (2012 a)). **About SimaPro**. Informação online disponível em [<http://www.pre-sustainability.com/content/simapro-lca-software>] acedido em 20 de Fevereiro de 2012.

PRé-consultants (2012 b)). **Databases**. Informação online disponível em [<http://www.pre-sustainability.com/content/databases>], acedido em 20 de Fevereiro de 2012.

Ruivo, J. e Viegas, J. (2004). **Resíduos de Construção e Demolição: Estratégia para um Modelo de Gestão**. Trabalho final de curso. Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal.

Sepúlveda, Jacinto (2007). **Reabilitação das construções – Programas de incentivo**. Informação disponível online em [<http://engenhariacivil.wordpress.com/2007/03/05/reabilitacao-das-construcoes-programas-de-incentivo/>] acedido em 13 de Abril de 2012.

Santos, C, P. (2007). **Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares**. Documento disponível online em [http://www.civil.uminho.pt/alvenaria/docs/041_064.pdf] acedido em 18 de Maio de 2011.

Silva, Leonor (2007). **Análise técnica/financeira de paredes exteriores em panos simples**. Tese de Mestrado Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal.

Silva, Sandra (2009). **A Sustentabilidade e o Conforto das Construções**. Tese de Doutoramento Engenharia Civil/Processos de Construção. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil: Guimarães.

Tirone, Livia (2011). **Coberturas Eficientes**. Guias para a Reabilitação Energético-Ambiental do Edificado. ADENE. Lisboa, Portugal.

VDI (1997). **Cumulative Energy Demand – Terms, Definitions, Methods of Calculation**. In: VDI – Richtlinien 4600. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

WCED (1987). **Our Common future**, World Commission on Environment Development. Oxford: Oxford University Press. p.43of CIB TG 16, Tampa, EUA.

ANEXOS

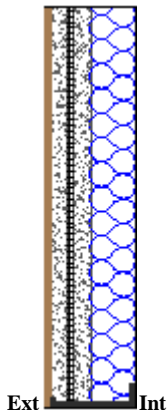
ANEXO I

BASE DE DADOS DE LCA

AI.1 FACHADAS

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos na quantificação das categorias de impacte ambiental de 8 soluções de reabilitação de fachadas.

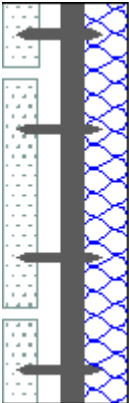
Solução Construtiva	Sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante							ID Fach. 1	
---------------------	--	--	--	--	--	--	--	---------------	--

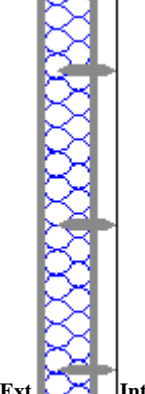


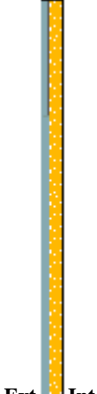
Fases do ciclo de vida	Categorias de impacte ambiental LCA							Energia incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER	
XPS	4,40E-02	3,43E+00	6,74E-08	2,16E-02	6,53E-03	1,87E-03	9,77E+01	9,60E-02	
Reboco	9,61E-02	2,89E+01	1,65E-06	6,70E-02	2,84E-03	1,15E-02	2,41E+02	1,49E+01	
Tinta	1,69E-02	1,76E+00	2,64E-07	1,21E-02	5,52E-04	3,03E-03	3,86E+01	2,36E+00	
Cradle-to-gate	1,57E-01	3,41E+01	1,98E-06	1,01E-01	9,92E-03	1,64E-02	3,77E+02	1,74E+01	
Comentários	Materiais considerados: Poliestireno expandido extrudido - XPS (isolamento térmico), reboco não tradicional armado com uma rede de fibra de vidro e tinta (acabamento final).								
Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacte ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).									
Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.									

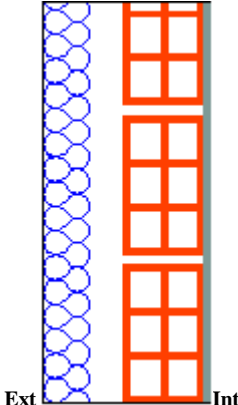
Solução Construtiva	Sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante							ID Fach. 2	
---------------------	--	--	--	--	--	--	--	---------------	--

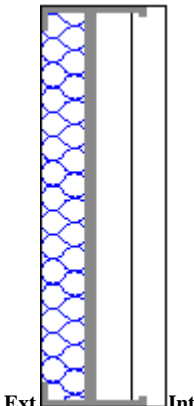
Fases do ciclo de vida	Categorias de impacte ambiental LCA							Energia incorporada	
	ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER	
XPS	4,40E-02	3,43E+00	6,74E-08	2,15E-01	6,53E-03	1,87E-03	9,77E+01	9,60E-02	
Reboco	4,71E-02	1,85E+01	7,54E-07	3,08E-02	1,21E-03	4,76E-03	1,22E+02	1,16E+01	
Tinta	1,69E-02	1,76E+00	2,64E-07	1,21E-02	5,52E-04	3,03E-03	3,86E+01	2,36E+00	
Cradle-to-gate	1,08E-01	2,37E+01	1,09E-06	2,58E-01	8,29E-03	9,66E-03	2,59E+02	1,41E+01	
Comentários	<p>Materiais considerados: Poliestireno expandido extrudido - XPS (isolamento térmico), reboco não tradicional armado com uma rede metálica em aço-galvanizado e tinta (acabamento final).</p> <p>Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacte ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).</p> <p>Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.</p>								

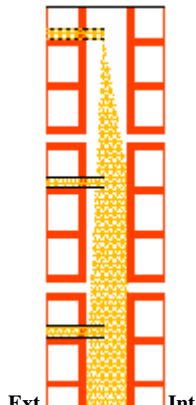
Solução Construtiva	Revestimentos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia							ID Fach. 3	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacte ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	4,47E-02	3,53E+00	8,17E-08	2,21E-02	6,56E-03	1,98E-03	1,15E+02	9,82E-02
	Aço inoxidável	9,86E-02	1,47E+01	9,64E-07	7,96E-02	6,59E-03	7,02E-03	2,28E+02	1,10E+00
	Placas cerâmicas	4,56E-01	5,82E+01	6,73E-06	2,53E-01	1,18E-02	3,45E-02	1,03E+03	1,91E+01
	Cradle-to-gate	5,99E-01	7,65E+01	7,78E-06	3,55E-01	2,50E-02	4,35E-02	1,37E+03	2,03E+01
	Comentários	Materiais considerados: Poliestireno expandido extrudido - XPS (isolamento térmico), estrutura de suporte em aço inoxidável, e placas cerâmicas (acabamento final).							
Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacte ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).									
Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.									

Solução Construtiva	Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados diretamente à parede							ID Fach. 4	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	4,40E-02	3,44E+00	6,81E-08	2,16E-02	6,53E-03	1,88E-03	9,78E+01	9,61E-02
	Aço-galvanizado	4,82E-01	4,82E+01	2,43E-06	2,46E-01	2,83E-02	4,98E-02	8,88E+02	7,08E+00
	Cradle-to-gate	5,26E-01	5,17E+01	2,50E-06	2,67E-01	3,49E-02	5,17E-02	9,86E+02	7,18E+01
	Comentários	Materiais considerados: Placa prefabricada com isolamento em poliestireno expandido extrudido (XPS) e revestimento exterior em aço-galvanizado. Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada). Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							

Solução Construtiva	Rebocos Isolantes	ID Fach. 5							
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	Reboco isolante	2,09E-02	4,47E+00	1,37E-07	1,14E-02	2,14E-03	1,32E-03	4,75E+01	8,73E-01
	Tinta	1,71E-02	1,80E+00	2,67E-07	1,22E-02	5,79E-04	3,05E-03	3,90E+01	2,36E+00
	Cradle-to-gate	3,80E-02	6,26E+00	4,04E-07	2,37E-02	2,72E-03	4,36E-03	8,66E+01	3,24E+00
	Comentários	Materiais considerados: Reboco com grânulos de isolante térmico e tinta para acabamento do revestimento. Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada). Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							

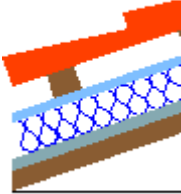
Solução Construtiva	Execução de uma contrafachada pelo interior em alvenaria	ID Fach. 6							
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	4,40E-02	3,43E+00	6,74E-08	2,16E-02	6,53E-03	1,87E-03	9,77E+01	9,60E-02
	Tijolos cerâmicos	1,05E-01	1,82E+01	1,61E-06	6,05E-02	3,82E-03	9,30E-03	2,37E+02	1,37E+01
	Argamassa/reboco	4,47E-02	1,76E+01	7,16E-07	2,91E-02	1,14E-03	4,52E-03	1,16E+02	1,10E+01
	Tinta	1,71E-02	1,80E+00	2,67E-07	1,22E-02	5,79E-04	3,05E-03	3,90E+01	2,36E+00
	Cradle-to-gate	2,11E-01	4,10E+01	2,66E-06	1,23E-01	1,21E-02	1,87E-02	4,90E+02	2,72E+01
	Comentários	Materiais considerados: Poliestireno expandido extrudido - XPS (isolamento térmico); Tijolos cerâmicos furados de 11, argamassas de reboco e assentamento (contrafachada em alvenaria de tijolo) e tinta para acabamento. Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada). Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							


Solução Construtiva	Execução de uma contrafachada pelo interior em gesso							ID Fach. 7	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	4,40E-02	3,43E+00	6,74E-08	2,16E-02	6,53E-03	1,87E-03	9,77E+01	9,60E-02
	Gesso cartonado	5,44E-02	1,05E+01	5,60E-07	3,33E-02	4,49E-03	4,87E-03	1,25E+02	1,64E+00
	Alumínio	3,49E-02	5,22E+00	3,50E-07	2,82E-02	2,31E-03	2,57E-03	8,08E+01	3,82E-01
	Reboco	1,42E-02	5,59E+00	2,27E-07	9,27E-03	3,65E-04	1,43E-03	3,69E+01	3,50E+00
	Tinta	1,69E-02	1,76E+00	2,64E-07	1,21E-02	5,52E-04	3,03E-03	3,86E+01	2,36E+00
	Cradle-to-gate	1,61E-01	2,65E+01	1,47E-06	1,04E-01	1,42E-02	1,38E-02	3,79E+02	7,99E+00
Comentários		<p>Materiais considerados: Poliestireno expandido extrudido - XPS (isolamento térmico); Painéis de gesso cartonado, alumínio (perfis de suporte), argamassas de reboco (contrafachada em gesso cartonado) e tinta para acabamento.</p> <p>Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).</p> <p>Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.</p>							

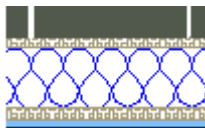
Solução Construtiva	Injeção de isolamento na caixa-de-ar de paredes dupla							ID Fach. 8	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	4,13E-02	3,94E+00	4,85E-07	1,68E-02	2,10E-03	3,36E-03	8,90E+01	6,73E-01
	Cradle-to-gate	4,13E-02	3,94E+00	4,85E-07	1,68E-02	2,10E-03	3,36E-03	8,90E+01	6,73E-01
	Comentários	Materiais considerados: Espuma de ureia-formaldeído (injeção na caixa-de-ar de uma parede dupla).							
	Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).								
Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.									

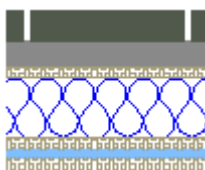
I.2 COBERTURAS

Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos na quantificação das categorias de impacte ambiental de 4 soluções de reforço de isolamento térmico em coberturas.

Solução Construtiva	Reforço do isolamento térmico nas vertentes inclinadas							ID Cob. 1	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	8,90E-02	7,03E+00	1,61E-07	4,40E-02	1,31E-02	3,95E-03	1,98E+02	1,95E-01
	Telhas cerâmicas	2,15E-01	2,66E+01	2,93E-06	1,07E-01	5,00E-03	1,20E-02	479,97	1,11E+01
	Silicone	1,07E-01	1,14E+01	8,50E-06	4,66E-01	2,73E-03	6,17E-03	2,34E+02	8,95E+00
	Pinho	1,88E-01	-3,98E+02	2,65E-06	1,59E-01	1,68E-02	2,83E-02	4,74E+02	4,78E+03
	Cradle-to-gate	5,99E-01	-3,53E+02	1,42E-05	7,76E-01	3,76E-02	5,04E-02	1,39E+03	4,80E+03
Comentários		Materiais considerados: Poliestireno extrudido expandido (XPS), revestimento exterior telha cerâmica, uma camada de impermeabilizante de silicone líquido e estrutura de suporte em madeira em pinho. Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada). Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							

Solução Construtiva	Reforço do isolamento térmico nas esteiras horizontais							ID Cob. 2	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	7,36E-01	5,92E+00	1,39E-07	3,70E-02	1,10E-02	3,33E-03	1,66E+02	1,64E-01
	Telhas cerâmicas	2,15E-01	2,66E+01	2,93E-06	1,07E-01	5,00E-03	1,20E-02	4,80E+02	1,11E+01
	Silicone	2,50E-01	-5,28E+02	3,51E-06	2,11E-01	2,23E-02	3,76E-02	629,0125	1,26E+02
	Pinho	1,07E-01	1,14E+01	8,50E-06	4,66E-01	2,87E-03	6,17E-03	2,34E+02	8,95E+00
	Cradle-to-gate	1,25E+00	-3,54E+02	1,42E-05	7,69E-01	3,56E-02	4,98E-02	1,35E+03	4,80E+03
Comentários		Materiais considerados: Poliestireno extrudido expandido, revestimento exterior telha cerâmica, uma camada de impermeabilizante de silicone líquido e estrutura de suporte em madeira em pinho. Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada). Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							

Solução Construtiva	Reforço do isolamento térmico em coberturas invertidas							ID Cob. 3	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	7,36E-01	5,92E+00	1,39E-07	3,70E-02	1,10E-02	3,33E-03	1,66E+02	1,64E-01
	Geotêxtil	1,06E-01	6,93E+00	1,79E-06	4,84E-02	2,37E-03	5,78E-03	2,74E+02	3,79E+00
	Silicone	1,07E-01	1,14E+01	8,50E-06	4,66E-01	2,73E-03	6,17E-03	2,34E+02	8,95E+00
	Lajeta de betão	5,46E-02	1,40E+01	8,87E-07	4,15E-02	1,86E-03	7,45E-03	1,27E+02	3,35E+00
	Cradle-to-gate	2,68E-01	3,24E+01	1,12E-05	5,56E-01	6,95E-03	1,94E-02	6,35E+02	1,61E+01
Comentários	Materiais considerados: Poliestireno extrudido expandido (ICB), lajetas de betão, membrana impermeabilizante em silicone líquido, membrana de geotêxtil.								
Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).									
Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.									

Solução Construtiva	Reforço do isolamento térmico sobre impermeabilização existente							ID Cob. 4	
	Fases do ciclo de vida	Categorias de impacto ambiental LCA						Energia incorporada	
		ADP	GWP	ODP	AP	POCP	EP	ENR	ER
	XPS	1,19E-01	9,39E+00	2,15E-07	5,87E-02	1,74E-02	5,26E-03	2,63E+02	2,61E-01
	Argamassa	2,52E-02	1,02E+01	3,76E-07	1,91E-02	7,40E-04	3,25E-03	5,83E+01	7,10E+00
	Geotêxtil	1,20E-01	5,06E+00	6,24E-09	3,53E-02	1,14E-03	3,13E-03	262,5643	3,19E-02
	Silicone	1,07E-01	1,14E+01	8,50E-06	4,66E-01	2,73E-03	6,17E-03	2,34E+02	8,95E+00
	Lajeta de betão	5,46E-02	1,40E+01	8,87E-07	3,59E-02	1,86E-03	7,45E-03	1,27E+02	3,35E+00
	Cradle-to-gate	4,27E-01	5,00E+01	9,99E-06	6,15E-01	2,38E-02	2,52E-02	9,46E+02	1,97E+01
Comentários		Materiais considerados: Poliestireno extrudido expandido (ICB), lajetas de betão, membrana impermeabilizante em silicone líquido, membrana de geotêxtil e argamassa de proteção.							
		Método (s) de LCA: CML 2 baseline 200 versão 2.04 (para avaliar o impacto ambiental) e Cumulative Energy Demand versão 1.04 (para avaliar a energia incorporada).							
		Bibliotecas do LCI: Ecoinvent system process.							

ANEXO II

ÍNDICE DE ISOLAMENTO A SONS AÉREOS

AII.1. FACHADAS

Nas fichas seguintes apresentam-se os cálculos do índice de isolamento a sons aéreos para as oito soluções de reabilitação de fachadas.

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (427,82) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 53 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,04} \left(\frac{1}{166,19} + \frac{1}{261,67} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 42 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 49 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 49 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 47$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 47 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 42\text{dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (427,85) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 53 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,04} \left(\frac{1}{166,19} + \frac{1}{261,67} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 42 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 49 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 49 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 47$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 47 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 42\text{dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (386,35) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 52 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,04} \left(\frac{1}{166,19} + \frac{1}{220,17} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 43 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 50 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 50 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 48$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 48 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 43\text{dB}$$

ID Fach. 4	Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados diretamente à parede
---------------	---

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (364,55) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 52 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,04} \left(\frac{1}{166,19} + \frac{1}{198,37} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 44 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 50 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 50 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 48$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 48 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 43\text{dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (338,38) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 51 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,04} \left(\frac{1}{166,19} + \frac{1}{198,37} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 44 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 48 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 48 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 46$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 46 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 41 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (369,31) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 52 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.6] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos triplos será:

$$K_1 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_1} = 10370 \text{ e } K_2 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_2} = 10370$$

$$(m_1 m_2 m_3) (f_{\text{ress}}^2)^2 - [K_1 m_3 (m_1 + m_2) + K_2 m_1 (m_2 + m_3)] f_{\text{ress}}^2 + [K_1 K_2 (m_1 + m_2 + m_3)] = 0$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 15,90 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = 9,17 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = -15,90 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = -9,17 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

$$f_{c3} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c3} = 182$$

Como $f_{c1}=f_{c2}=f_{c3}$ quebra de 9dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w=49 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 49 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 47$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 47 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 42 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (373,48) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 51 \text{ dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.6] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos triplos será:

$$K_1 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_1} = 10370 \text{ e } K_2 = \frac{\rho \cdot c^2}{d_2} = 10370$$

$$(m_1 m_2 m_3) (f_{\text{ress}}^2)^2 - [K_1 m_3 (m_1 + m_2) + K_2 m_1 (m_2 + m_3)] f_{\text{ress}}^2 + [K_1 K_2 (m_1 + m_2 + m_3)] = 0$$

$$\Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 15,90 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = 9,17 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = -15,90 \text{ Hz} \cup f_{\text{ress}} = -9,17 \text{ Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c1} = 182$$

$$f_{c2} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c2} = 182$$

$$f_{c3} = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_{c3} = 3200$$

Como $f_{c1}=f_{c2}$ quebra de 9dB e $f_{c2} \neq f_{c3}$ quebra de 6dB

4) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w=49 \text{ dB}$$

5) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 49 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 47$$

6) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 47 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0$$
$$\Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 42 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.3], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (333,66) + 11,1 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 47 \text{ dB}$$

2) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_c = \frac{2000}{11} \Leftrightarrow f_c = 182, \text{ com uma quebra de } 9 \text{ dB}$$

3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 48 \text{ dB}$$

4) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 48 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 46$$

5) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{2m,nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}} \right) + \Delta L_{fs} \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 46 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) + 0 \\ \Leftrightarrow D_{2m,nT,w} = 41 \text{ dB}$$

AIII.2. COBERTURAS

Nas fichas seguintes apresentam-se os cálculos do índice de isolamento a sons aéreos para as quatro soluções de reforço de isolamento térmico de fachadas.

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.4], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} + \text{Dif} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (2531,75) + 11,1 + 4 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 64\text{dB}$$

2) Frequência de ressonância do conjunto

De acordo com a equação [4.5] a frequência de ressonância do conjunto das massas e da caixa-de-ar é calculada para os elementos duplos será:

$$f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 84 \sqrt{\frac{1}{0,25} \left(\frac{1}{37,75} + \frac{1}{2494,00} \right)} \Leftrightarrow f_{\text{ress}} = 28\text{Hz}$$

3) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_{c1} = \frac{12000}{8} \Leftrightarrow f_{c1} = 1500\text{Hz}$$

$$f_{c2} = \frac{18000}{4} \Leftrightarrow f_{c2} = 4500 \text{ Hz}$$

Como $f_{c1} \neq f_{c2}$, f_{c1} terá uma quebra de 4dB e f_{c2} com quebra de 2dB.

4) Frequência de ressonância do desvão

$$f_{c1} = \frac{340}{2 \times 0,25} \Leftrightarrow f_{c1} = 680\text{Hz}$$

5) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a Figura III.2.1.

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w=59\text{dB}$$

6) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 59 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 57$$

7) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 S} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 57 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 52 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.3], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (2531,05) + 11,1 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 60 \text{ dB}$$

2) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_c = \frac{1800}{10} \Leftrightarrow f_c = 180, \text{ com uma quebra de } 8 \text{ dB}$$

3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a Figura III.2.2.

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 61 \text{ dB}$$

4) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 61 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 59$$

5) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 59 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 54 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.3], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \log(m) + 11,1 \text{ dB} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \log(2647,58) + 11,1 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 60 \text{ dB}$$

2) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_c = \frac{18000}{8} \Leftrightarrow f_c = 3600, \text{ com uma quebra de } 8 \text{ dB}$$

3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a Figura III.2.3.

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 60 \text{ dB}$$

4) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 60 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 58$$

5) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log\left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}}\right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 58 + 10 \log\left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1}\right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 53 \text{ dB}$$

1) Aplicação da lei da massa

De acordo com a equação [4.3], o índice de isolamento acústico previsto para a frequência de 500 Hz será:

$$R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (m) + 11,1 \text{ dB} \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 14,3 \text{ Log } (2585,66) + 11,1 \\ \Leftrightarrow R_{(500 \text{ Hz})} = 60 \text{ dB}$$

2) Frequência crítica

De acordo com a equação [4.7] e o quadro 4.2 valor da frequência crítica será:

$$f_c = \frac{18000}{8} \Leftrightarrow f_c = 3600, \text{ com uma quebra de } 8 \text{ dB}$$

3) Curva de isolamento a sons de condução aérea

Utilizando o modelo de previsão apresentado, a curva de isolamento sonoro desenvolve-se conforme a Figura III.2.4.

Considerado o traçado apresentado na figura I.1 e assumindo os valores de isolamento nas frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava (entre 100 e 5000 Hz), o índice de redução sonora é:

$$R_w = 60 \text{ dB}$$

4) Quantificação da transmissão marginal

De acordo com a equação [4.8] o valor do índice de redução sonora ponderado aparente (R'_w) será:

$$R'_w = R_w - \Delta TM \Leftrightarrow R'_w = 60 - 2 \Leftrightarrow R'_w = 58$$

5) Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea padronizado

Com base na equação [4.10] o desempenho de isolamento sonoro a sons de condução aérea será:

$$D_{nT,w} = R'_w + 10 \log \left(\frac{0,16 \text{ V}}{T_0 \text{ S}} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 58 + 10 \log \left(\frac{0,16 \times 1}{0,5 \times 1} \right) \Leftrightarrow D_{nT,w} = 53 \text{ dB}$$

ANEXO III

BASE DE DADOS DOS CUSTOS ECONÓMICOS

AIII.1. FACHADAS

Nas tabelas seguintes apresentam-se as análises económicas das soluções de reabilitação de fachadas.

ID Fach. 1	Sistemas de isolamento térmico por revestimento delgado sobre o isolante	Preço do artigo
	Argamassa	3,36
	Perfil de arranque de alumínio.	1,14
	Perfil de canto de alumínio.	0,96
	Painel rígido de poliestireno expandido de 30 mm de espessura	2,15
	Bucha de expansão e prego de polipropileno, com aro de estanquidade, para fixação de placas isolantes.	0,48
	Argamassa hidráulica.	7,84
	Malha em rede de fibra de vidro	2,89
	Argamassa hidráulica	3,36
	Oficial de 1ª rebocador	7,00
	Ajudante rebocador	6,75
	Operário especializado rebocador	5,35
	Meios auxiliares	0,51
	Custos indiretos	0,78
Custo Total		41,28

ID Fach. 2	Sistemas de isolamento térmico por revestimento espesso sobre o isolante	Preço do artigo
	Argamassa hidráulica	3,36
	Perfil de arranque de alumínio.	1,14
	Perfil de canto de alumínio.	0,96
	Painel rígido de poliestireno expandido de 30 mm de espessura	2,15
	Bucha de expansão e prego de polipropileno, com aro de estanquidade, para fixação de placas isolantes.	0,48
	Argamassa hidráulica	7,84
	Malha metálica	4,39
	Argamassa hidráulica	3,36
	Oficial de 1ª rebocador	7,00
	Ajudante rebocador	6,75
	Operário especializado rebocador	5,35
	Meios auxiliares	0,54
	Custos indiretos	0,82
Custo Total		42,78

ID Fach. 3	Revestimentos fixados ao suporte através de uma estrutura intermédia	Preço do artigo
	Ladrilho cerâmico	72,45
	Fixação mecânica para painéis isolantes de poliestireno expandido, colocados diretamente sobre a superfície suporte.	1,20
	Painel rígido de poliestireno expandido de 30 mm de espessura	2,15
	Oficial de 1ª montador	14,74
	Ajudante montador	13,76
	Oficial de 1ª construção	1,90
	Ajudante montador	1,72
	Meios auxiliares	0,03
	Custos indiretos	0,05
Custo Total		107,92

ID Fach. 4	Componentes prefabricados constituídos por um isolante e um paramento, fixados diretamente à parede	Preço do artigo
	Chapa perfilada lisa de aço galvanizado de 0,4 mm de espessura e 30 mm de altura	6,57
	Painel rígido de poliestireno expandido de 30 mm de espessura	2,15
	Bandeja de chapa nervurada de aço-galvanizado de 0,6 mm de espessura, para utilização em paramentos multicamada.	17,33
	Remate lateral de aço galvanizado, espessura de 0,6 mm, desenvolvimento 500 mm	1,51
	Parafuso autorroscante de 6,5x70mm de aço inoxidável com anilha	0,75
	Junta de estanquidade para chapas de aço	0,38
	Parafuso autorroscante de 4,2x13mm de aço inoxidável com anilha	0,10
	Oficial de 1ª construção.	4,94
	Ajudante montador.	4,62
	Meios auxiliares	0,19
	Custos indiretos	0,30
Custo Total		38,35

ID Fach. 5	Rebocos Isolantes	Preço do artigo
	Argamassa para revestimento térmico e acústico	6,40
	Pasta de gesso para aplicação em camada fina	0,27
	Cantoneiras de plástico e metal. Estáveis à ação dos sulfatos	0,08
	Misturadora-bombadora para argamassas e gessos projetados, 3 m ³ /h	0,84
	Oficial de 1ª estucador	3,64
	Ajudante estucador	2,06
	Meios auxiliares	0,00
	Custos indiretos	0,00
Custo Total		13,29

ID Fach. 6	Execução de uma contrafachada pelo interior em alvenaria	Preço do artigo
	Tijolo cerâmico furado duplo, 30x20x11cm	2,02
	Argamassa de cimento	1,04
	Oficial de 1ª construção	5,52
	Operário não qualificado construção	2,50
	Fixação mecânica para painéis isolantes de poliestireno expandido, colocados diretamente sobre a superfície suporte.	1,20
	Painel rígido de poliestireno expandido de 30 mm de espessura	2,85
	Oficial de 1ª construção	1,90
	Ajudante montador	1,72
	Meios auxiliares	0,07
	Custos indiretos	0,11
Custo Total		18,75

ID Fach. 7	Execução de uma contrafachada pelo interior em gesso	Preço do artigo
	Mestra 60/27 de chapa de aço galvanizado, de largura 60 mm	6,69
	Painel de gesso cartonado	6,74
	Material auxiliar (clipes, perfis em Z, etc.) para a fixação do painel sobre os montantes da parede interior	21,00
	Fita adesiva transparente, de dupla face, para a união entre placas do sistema para paredes divisórias	2,99
	Cartucho de 600 cm ³ de pasta à base de poliuretano para vedação de juntas de movimento	0,12
	Fundo de juntas cilíndrico, de espuma de polietileno, para vedação de juntas de movimento	0,03
	Oficial de 1ª montador	2,71
	Ajudante montador	1,26
	Meios auxiliares	0,08
	Custos indiretos	0,12
Custo Total		41,54

ID Fach. 8	Injeção de isolamento na caixa-de-ar de paredes dupla	Preço do artigo
	Fornecimento e aplicação de espuma para injeção, inclusive p/p de maquinaria, realização de furos e proteção de paramentos, caixilharias e outros elementos adjacentes.	6,75
	Meios auxiliares	0,00
	Custos indiretos	0,00
Custo Total		6,75

AIV.2 COBERTURAS

Nas tabelas seguintes apresentam-se as análises económicas das soluções de reabilitação de coberturas.

ID Cob. 1	Reforço do isolamento térmico nas vertentes inclinadas	Preço do artigo
	Fixação mecânica para painéis isolantes de poliestireno extrudido expandido diretamente sobre a superfície suporte.	1,20
	Painel de poliestireno extrudido expandido 0,06m de espessura	5,45
	Oficial de 1ª construção	1,90
	Ajudante montador	1,72
	Banda impermeabilizante de silicone	0,48
	Meios auxiliares	0,22
	Custos indiretos	0,34
Custo Total		11,02

ID Cob. 2	Reforço do isolamento térmico nas esteiras horizontais	Preço do artigo
	Fixação mecânica para painéis isolantes de poliestireno extrudido expandido diretamente sobre a superfície suporte.	1,20
	Painel de poliestireno extrudido expandido 0,05m de espessura	4,54
	Oficial de 1ª construção	1,90
	Ajudante montador	1,72
	Banda impermeabilizante de silicone	0,48
	Meios auxiliares	0,20
	Custos indiretos	0,31
Custo Total		10,07

ID Cob. 3	Reforço do isolamento térmico em coberturas invertidas	Preço do artigo
	Bloco de betão para revestir	23,92
	Geotêxtil não tecido composto por fibras de poliéster entrelaçadas	1,64
	Painel de poliestireno extrudido expandido 0,05m de espessura	4,54
	Banda impermeabilizante de silicone	0,48
	Oficial de 1ª impermeabilizador.	6,64
	Ajudante impermeabilizador.	6,45
	Oficial de 1ª ladrilhador.	0,78
	Ajudante ladrilhador.	2,42
	Meios auxiliares	0,33
	Custos indiretos	0,50
Custo Total		47,10

ID Cob. 4	Reforço do isolamento térmico sobre impermeabilização existente	Preço do artigo
	Bloco de betão	23,92
	Geotêxtil não tecido composto por fibras de poliéster entrelaçadas	1,64
	Painel de poliestireno extrudido expandido 0,08m de espessura	7,27
	Geotêxtil não tecido composto por fibras de poliéster entrelaçadas	1,64
	Banda impermeabilizante de silicone	0,48
	Oficial de 1ª impermeabilizador	6,64
	Ajudante impermeabilizador	6,45
	Oficial de 1ª ladrilhador	0,94
	Ajudante ladrilhador	0,39
	Meios auxiliares	0,30
	Custos indiretos	0,46
Custo Total		49,73

